

Guy RANCHIN

Contribution à l'étude de la répartition de l'uranium à l'état de traces dans les roches granitiques saines

Les granites à teneur élevée
du massif de Saint-Sylvestre
(Limousin - Massif Central français)

Extrait de

SCIENCES DE LA TERRE, Tome XIII (1968), n° 2 pages 159 à 205, 6 fig., 7 tabl., 8 pl. h.-t.

NANCY, juin 1968

SCIENCES DE LA TERRE

ANNALES DE L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE GÉOLOGIE APPLIQUÉE
ET DE PROSPECTION MINIÈRE DE L'UNIVERSITÉ DE NANCY
ET DU CENTRE DE RECHERCHES PÉTROGRAPHIQUES ET GÉOCHIMIQUES (C. N. R. S.)

Éditées par la

FONDATION SCIENTIFIQUE DE LA GÉOLOGIE ET DE SES APPLICATIONS

94, Avenue de Lattre de Tassigny - NANCY - Meurthe-et-Moselle (France)

La « Fondation Scientifique de la Géologie et de ses Applications » édite :

— LA REVUE « SCIENCES DE LA TERRE », qui publie en principe un tome annuel comprenant quatre numéros séparés de 120 pages environ. Chacun de ces numéros est composé de plusieurs articles se rapportant principalement aux disciplines suivantes : Pétrographie, Géochimie, Métallogénie, Sédimentologie, Radiogéologie, Hydrogéologie, etc...

Prix de l'abonnement au Tome XII (1967) : 60 francs + frais d'envoi. *Vente au numéro* : prix variable suivant l'importance du volume.

— LES MÉMOIRES « SCIENCES DE LA TERRE », dont la parution n'est pas soumise à périodicité et dont chaque numéro, d'une centaine de pages au minimum, est consacré à un seul sujet (Pétrographie, Métallogénie, Géologie régionale, Géophysique, Géochimie, Traitement des Minerais, etc...).

Vente au numéro : prix variable suivant l'importance du Mémoire. *Expédition automatique* dès parution sur ordre d'achat permanent résiliable à tout moment.

Envoi du Catalogue complet sur simple demande adressée à la Fondation Scientifique de la Géologie et de ses Applications — B. P. 452 — 54 NANCY (France).

Guy RANCHIN

Contribution à l'étude de la répartition de l'uranium à l'état de traces dans les roches granitiques saines

Les granites à teneur élevée
du massif de Saint-Sylvestre
(Limousin - Massif Central français)



Digitized by the Internet Archive
in 2026



https://archive.org/details/IA41551919_0014

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA RÉPARTITION DE L'URANIUM A L'ÉTAT DE TRACES DANS LES ROCHES GRANITIKUES SAINES LES GRANITES A TENEUR ÉLEVÉE DU MASSIF DE SAINT-SYLVESTRE (LIMOUSIN - MASSIF CENTRAL FRANÇAIS)

par Guy RANCHIN*

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	163	ZUSAMMENFASSUNG	164
ABSTRACT	163	Содержание	165
INTRODUCTION	166		
I — LA GÉOCHIMIE DE L'URANIUM DANS LA PARTIE OCCIDENTALE DU GRANITE A DEUX MICAS DE SAINT-SYLVESTRE	167		
A — Variations primaires de la teneur en uranium dans un faciès homogène — Problème des gradients — Représentativité d'un sondage	167	cristaux d'uraninite — Minéraux et éléments associés	177
1. Calcul de l'erreur analytique	169	a) <i>Uraninite incluse dans la pyrite</i>	178
2. Variations de la teneur en uranium dans un sondage court	170	b) <i>Uraninite enfermée dans une gangue ferrugineuse</i>	178
3. Variations de la teneur en uranium sur des distances courtes.	172	c) <i>Uraninite incluse dans les plagioclases</i>	179
4. Variations de la teneur en uranium pour l'ensemble du faciès considéré	174	d) <i>Uraninite incluse dans la biotite</i>	179
5. Conclusions	174	e) <i>Uraninite incluse dans la muscovite et le quartz</i>	180
B — Localisation de l'uranium dans le granite à deux micras de Saint-Sylvestre.	175	f) <i>Rôle des phénomènes d'altération deutérique dans la formation des auréoles entourant les cristaux d'uraninite</i>	181
1. Généralités — Rappel des connaissances acquises sur le granite à deux micras de Saint-Sylvestre ..	176	3. Les corps opaques radioactifs (autres que l'uraninite)	181
2. L'environnement auréolaire des		a) <i>Produits ferrugineux</i>	181
		b) <i>Pyrites radioactives</i>	182
		4. Les minéraux accessoires transparents radioactifs	182
		a) <i>Apatites</i>	183
		b) <i>Monazites et zircons</i>	183
		5. Uranium diffus	185

* Centre de Recherches Radiogéologiques, Route de Neufchâteau, 54 — Nancy-Vandœuvre.

II — LA GÉOCHIMIE DE L'URANIUM DANS LE GRANITE A GRAIN FIN A DEUX MICAS (GRANITE DE CHATEAUPONSAC)	186	CONCLUSIONS	194
A — Teneur en uranium de la roche saine profonde	186	1. Variations de la teneur en uranium à l'intérieur d'un même faciès granitique	194
B — Localisation de l'uranium dans le granite de Chateauponsac	188	2. Teneurs en uranium des différents granites du massif	194
III — LA GÉOCHIMIE DE L'URANIUM DANS LE GRANITE ORIENTÉ A SILLIMANITE (GRANITE DE LA BRAME)	190	3. Localisation de l'uranium	195
IV — AGE DE L'URANINITE DANS LES GRANITES DU MASSIF DE SAINT-SYLVESTRE — URANIUM ET DIFFÉRENCIATION GRANITIQUE ..	192	4. Environnement auréolaire des cristaux d'uraninite — Phénomènes d'altération deutérique et éléments associés à l'uranium	195
		5. Age de l'uraninite — Conséquences géologiques	196
		BIBLIOGRAPHIE	197

ILLUSTRATIONS

FIG. 1. — Carte géologique du Massif de Saint-Sylvestre. Localisation des échantillonnages profonds en roche saine (mines et sondages)	168
2. — Histogramme des valeurs en uranium dosées dans le granite de référence GR	170
3. — Granite à deux micras de Saint-Sylvestre (zone occidentale). Répartition des teneurs en uranium dans la partie saine des sondages et des travers-bancs	171
4. — Granite de la Brame et granite de Chateauponsac. Répartition des teneurs en uranium dans la partie saine des sondages	187
5. — Granite à deux micras de Saint-Sylvestre. Variations comparées des teneurs en uranium et de l'abondance de l'uraninite	188
6. — Granite de Chateauponsac et granite de la Brame. Variations comparées des teneurs en uranium et de l'abondance de l'uraninite	189
PL. I. — Cristaux d'uraninite inclus dans la pyrite, la muscovite ou le feldspath potassique. (Granite à deux micras de Saint-Sylvestre)	200
II. — Résidus d'uraninite inclus dans un oxyde de fer rougeâtre et éléments associés (zone d'altération commençante). (Granite à deux micras de Saint-Sylvestre)	201
III. — Cristaux d'uraninite inclus dans le plagioclase, la biotite ou la muscovite. (Granite à deux micras de Saint-Sylvestre)	202
IV. — Association d'oxyde de fer et d'oxyde d'uranium cryptocristallins dans les fissures du quartz. (Granite à deux micras de Saint-Sylvestre).	
V. — Pyrite uranifère. Monazites et zircons inclus dans la biotite. (Granite à deux micras de Saint-Sylvestre).	
VI. — Répartition du thorium, du cérium et du lanthane dans la monazite. Granite à deux micras de Saint-Sylvestre)	203
VII. — Cristal d'uraninite associé à la pyrite. Cristal d'uraninite inclus dans un plagioclase et son environnement auréolaire. (Granite de Chateauponsac)	204
VIII. — Cristaux d'uraninite et leur environnement auréolaire. (Granite de Chateauponsac). »	205
TABL. 1. — Erreur analytique de la méthode de dosage de l'uranium	170
2. — Granite à deux micras de Saint-Sylvestre. Teneurs (en $\mu\text{g/g}$) en uranium de la roche saine profonde	172
3. — Teneurs moyennes en uranium de la roche saine profonde dans les différents granites du massif de Saint-Sylvestre : signification statistique des différences observées	173
4. — Teneurs en thorium et en uranium des monazites	184
5. — Granite de la Brame et granite de Chateauponsac. Teneurs (en $\mu\text{g/g}$) en uranium de la roche saine profonde	187
6. — Répartition de l'uraninite entre les différents minéraux du granite	189
7. — Teneurs en éléments radioactifs et en plomb radiogénique des cristaux d'uraninite dans les granites du Massif de Saint-Sylvestre. Age chimique des cristaux	192

RÉSUMÉ

L'étude de la localisation et des variations primaires de la teneur en uranium dans les granites du Massif uranifère de Saint-Sylvestre a été effectuée à l'aide d'échantillons prélevés dans des sondages ou dans les parties stériles de certains ouvrages miniers, au-dessous de la zone d'oxydation et d'altération superficielle. De ce fait, sont exclues les formes de répartition secondaire de l'uranium et les perturbations dans les teneurs liées à l'altération.

Dans un faciès pétrographique homogène comme le granite à deux micas de Saint-Sylvestre, les variations de la teneur sont peu importantes dans les roches qui n'ont pas subi l'influence de l'altération superficielle. Dans un sondage et sur des distances de l'ordre de 1 km, la teneur reste pratiquement constante; en tout cas les variations observées ne sont pas supérieures à celles qui résultent normalement des écarts analytiques. Dans un granite hétérogène, comme le granite gneissique de la Brame, des variations plus importantes sont observées, et, à l'intérieur d'un sondage, elles dépassent les écarts analytiques, ceci par suite d'une répartition irrégulière des cristaux d'uraninite.

Les teneurs en uranium du granite à deux micas de Saint-Sylvestre (zone Ouest) s'échelonnent entre 17,40 et 22 $\mu\text{g/g}$. La teneur en uranium du granite gneissique de la Brame est égale à 14,90 $\mu\text{g/g}$ dans le sondage CS 2. Celle du granite à grain fin à deux micas associé à ce granite gneissique (Chateauponsac) est égale à 18,20 $\mu\text{g/g}$ dans le sondage CS 1. Tous les granites du massif ont une teneur en uranium élevée, et cette caractéristique est liée à l'abondance exceptionnelle de l'uraninite dans ces granites.

Particulièrement dans les granites à deux micas, l'uraninite est associée à une gangue complexe, avec de la pyrite, des phyllites, des carbonates, des oxydes de fer, et de nombreux éléments qui ont été décelés à l'aide de la microsonde électronique et qui ne paraissent pas toujours exprimés sous forme de minéraux : Zr, P, Ca, Th, terres rares (Ce, La, Ne), Zn. Les différents éléments de la gangue, dont beaucoup sont caractéristiques des pegmatites, sont substitués au minéral-hôte et se disposent sous forme d'auréoles concentriques successives autour des cristaux d'uraninite. La cristallisation de l'uraninite serait donc une manifestation deutérique qui prendrait place parmi les phases tardives de la granitisation.

Bien que très approximatifs, les âges chimiques des cristaux d'uraninite calculés à partir des proportions respectives d'uranium et de plomb radiogénique laissent présumer qu'il y a une seule phase de cristallisation de l'uraninite pour l'ensemble du massif. De même que les pegmatites et les minéralisations en Sn, W, Au, l'enrichissement en uranium qui a amené la cristallisation de l'uraninite est lié à la formation du granite à deux micas de Saint-Sylvestre. Dans ce qui est aujourd'hui le domaine des granites gneissiques, les remobilisations ne furent que partielles et ont donné naissance aux amas de granite à grain fin et à deux micas du type Chateauponsac. Dans les septa résiduels de granite gneissique, il y a eu néanmoins un apport d'uranium et cristallisation de l'uraninite, au moins dans les zones situées près du contact avec le granite à deux micas de Saint-Sylvestre, où l'influence de cette granitisation a été plus marquée.

Ces caractéristiques de l'uranium à l'état de traces dans les granites du Massif de Saint-Sylvestre définissent un contexte géochimique auxquels sont liés les gisements d'uranium intra-granitiques dans l'Ouest du Massif Central.

ABSTRACT

Contribution to the study on the distribution of uranium traces in unweathered granitic rocks. High-grade granites of the « Massif de Saint-Sylvestre » (Limousin - French « Massif Central »).

Occurrence and primary variations of uranium content in granites of the uraniferous « Massif de Saint-Sylvestre » have been studied on samples taken from borings or from sterile parts of mines, beneath the oxidizing and superficial weathered zone. Therefore, types of uranium of secondary distribution and the perturbed contents of weathered parts are not described in this paper.

In a homogeneous petrographic facies such as the Saint-Sylvestre two-micas granite, content fluctuations are small in unweathered rocks. Inside a drilling, along 0,6 miles, the content remains practically unchanged; in any case, observed fluctuations are not greater than those issued from analytical deviations. In heterogeneous granite, such as « La Brame » gneissic granite, more important fluctuations may be noted and, inside a drilling, they exceed analytical deviations, owing to an uneven distribution of uraninite crystals.

Uranium contents of the Saint-Sylvestre two-micas granite (western part) are spread out between 17,40 and 22 $\mu\text{g/g}$. Uranium content of «La Brame» gneissic granite is 14,90 $\mu\text{g/g}$ in CS 2 drilling. The content of the fine-grained two-micas granite connected with the gneissic granite (Chateauponsac) is equal to 18,20 $\mu\text{g/g}$ in CS 1 drilling. Every granite of the Massif has a high uranium content, owing to unusual excess of uraninite.

In two-micas granites, more particularly, uraninite is connected with an intricate gangue with pyrite, phyllites, carbonates, iron oxides, and with many elements noticed by means of an electronic micro-probe, and which are not always crystallized as minerals: Zr, P, Ca, Th, rare earth elements (Ce, La, Ne), Zn. The different elements of the gangue, many of which are typical of pegmatites, are substituted to the host mineral and are disposed in the form of successive concentric halos around uraninite crystals. The crystallization of uraninite would thus be a deuterio phenomena, which could occur among later stages of granitization.

Although very approximate, chemical ages of uraninite crystals, computed from respective proportions of uranium and radioactive lead, show that there is only one stage of uraninite crystallization for the whole Massif. Just as for the mineralizations of pegmatites and Sn, W, and Au, the increase in uranium which has led to uraninite crystallization is connected with the composition of Saint-Sylvestre two-micas granite. In the present gneissic granites area, remobilizations are only partial and have formed masses of fine-grained and two-micas granite (Chateauponsac). In residual septa of gneissic granite, nevertheless, there has been uranium supply and uraninite crystallization, at least in areas near contact with the Saint-Sylvestre two-micas granite, where the influence of this granitization has had a very strong control.

The characteristics of trace uranium in the «Massif de Saint-Sylvestre» granites determine a geochemical context to which are connected the intragranitic uranium ores of the Western «Massif Central».

ZUSAMMENFASSUNG

Beitrag zur Kenntnis der Verteilung von Uranspuren in frischen granitischen Gesteinen. Die Granite mit erhöhten Urangelhalten des Massivs von Saint-Sylvestre (Limousin – französisches Zentralmassiv).

Die Untersuchung der Lokalisierung und der primären Variationen des Urangelhalts im Uranführenden Massiv von Saint-Sylvestre konnte durchgeführt werden dank einer Bemusterung durch Bohrungen. Taube Partien konnten in Grubenbauen unterhalb der Oxydationszone bemustert werden. Auf diese Weise konnten alle Faktoren einer sekundären Umlagerung ausgeschlossen werden ebenso wie oberflächennahe Verwitterungsbildungen.

Im Bereich einer petrographisch homogenen Fazies wie sie der Zweiglimmergranit von St-Sylvestre darstellt, sind Variationen des Urangelhalts wenig ausgeprägt, soweit die Gesteine keine oberflächliche Verwitterung erfahren haben. In einer Bohrung und selbst über Entfernungen von ca 1 Km bleiben die Gehalte praktisch konstant — jedenfalls im Streuungsbereich der analytischen Methoden. In einem heterogenen Granit, z.B. der Gneisgranit von la Brame wurden stärkere Streuungen beobachtet. Innerhalb einer Bohrung streuten die Werte weit über den Streuungsbereich der Analysenfehler, was auf eine unregelmässige Verteilung der Uraninitkristalle zurückgeführt werden konnte.

Die Urangelhalte des Zweiglimmergranits von St-Sylvestre (westliche Zone) liegen zwischen 17,40 und 22 $\mu\text{g/g}$. Für den Gneisgranit von La Brame wurde in der Probe CS 2 14,90 $\mu\text{g/g}$ gefunden. Der feinkörnige Zweiglimmergranit der dem Gneisgranit assoziiert ist (Granit von Chateauponsac) enthielt in Bohrung CS 1 18,20 $\mu\text{g/g}$. Alle Granite des Gebiets haben einen erhöhten Urangelhalt, der vor allem auf aussergewöhnliche Gehalte an Uraninit zurück zu führen ist.

Vor allem in den Zweiglimmergraniten tritt der Uraninit häufig in einer komplexen Gangart auf, zusammen mit Pyrit, Schichtgittersilikaten, Karbonaten und Eisenoxiden. Daneben wurden mit der Elektronensonde zahlreiche Elemente nachgewiesen, die sicher nicht alle in Form selbstständiger Mineralien auftreten: Zr, P, Ca, Th, Seltene Erden (Ce, La, Ne) und Zn. Die verschiedenen Begleitmineralien — viele davon typische Pegmatit-Mineralien, umgeben den Uraninit in Form von konzentrischen Aureolen — oder er tritt in einem dieser Minerale eingewachsen auf. Die Kristallisation des Uraninits ist somit eine deuterische Bildung, die in die letzten Phasen der Granitisation einzuordnen ist.

Die auf Grund der chemischen Uran und Bleianalysen berechneten Alter sind natürlich sehr ungenau, doch lassen sie vermuten, dass es im ganzen Massiv nur eine einzige Bildungsphase von Uraninit gegeben hat. Ebenso wie die Pegmatite und die Vorkommen von Zinn, Wolfram und

Gold ist das Auftreten von Uran an den Zweiglimmergranit von St-Sylvestre gebunden. Im Bereich der heutigen Gneisgranite kan es nur beschränkt zur Bildung von Remobilisationen — den Massen von feinkörnigen Zweiglimmergranit von Typ Chateauponsac. In den zwischen ihnen übriggebliebenen Septa von Gneisgranit kam es trotzdem zu einer Uranzufuhr, die als Uraninit kristallisierte — zum wenigsten in den Zonen nahe am Kontakt mit dem Zweiglimmergranit von St-Sylvestre, wo der Einfluss dieser Granitisation besonders deutlich ist.

Diese Eigenschaften des Urans als Spurenelement in den Graniten von St-Sylvestre charakterisieren den geochemischen Kontext, an dem auch die intergranitischen Uranlagerstätten im Westen des Zentralmassivs gebunden sind.

СОДЕРЖАНИЕ

Граниты

К изучению распределения следов урана в свежих гранитных горных породах. Граниты массива Сэн-Сильвестр (Лимузэн, Центральный французский массив) с высоким содержанием урана.

Изучение локализации и первичных вариаций содержания урана в ураноносных гранитах массива Сэн-Сильвестр производилось по образцам из буровых скважин или из пустых пород некоторых горных выработок, собранных ниже зоны окисления и выветривания. Поэтому, форма вторичного распределения урана и пертурбации в содержании его, связанные с выветриванием, исключаются.

В породах гомогенной петрографической фации, как двуслюдяной гранит Сэн-Сильвестра, не претерпевших выветривания, вариации в содержании урана незначительны. В скважинах, отстоящих друг от друга на расстоянии одного километра, содержание его, практически, остается постоянным; во всяком случае, наблюдаемые вариации не превышают нормально существующих при химическом анализе. В гранитах гетерогенных, как гранито-гнейс Брамь, наблюдаются вариации более сильные, и в одной из скважин, они превышают порог допустимой аналитической вариации вследствие нерегулярного распределения кристаллов уранинита.

Содержание урана в двуслюдяном граните Сэн-Сильвестра (западная зона) колеблется от 17,40 до 22 мкг/г; в гранито-гнейсе Брамь, в скважине CS 2, содержание урана равно 14,90 мкг/г. В двуслюдяном мелкозернистом граните, ассоциированном с гранито-гнейсом (Шатопонсак), в скважине CS 1, содержание урана 18,20 мкг/г. Все слагающие массив граниты отличаются повышенным содержанием урана и эта характеристика находится в связи с исключительным обилием уранинита в этих гранитах.

Уранинит ассоциирует, особенно в двуслюдяном граните, с жильным комплексом содержащим пирит, филлиты, карбонаты, окиси железа и многие другие элементы, которые были обнаружены при помощи электронного микроскопа и которые не всегда выражены в виде отдельных минералов: Zr, P, Ca, Th, редкие земли (Ce, La, Ne), Zn. Различные элементы жильного комплекса, из которых многие являются характерными для пегматитов, заместив главный минерал, представляются в виде последовательных концентрических ореолов вокруг кристаллов уранинита. Таким образом, кристаллизация уранинита является, повидимому, дейтерическим явлением, имевшим место в одной из поздних фаз гранитизации.

Несмотря на весьма приблизительный химический возраст кристаллов уранинита, вычисленный по соответствующим содержаниям урана и радиогенного свинца, все-таки можно допустить существование единой фазы кристаллизации уранинита во всем массиве. Также как и в пегматитах с Sn, W, Au, обогащение ураном, вызвавшее кристаллизацию уранинита, связано с образованием двуслюдяного гранита типа Сэн-Сильвестр. В том, что теперь является областью гранито-гнейсов, последующие мобилизации, будучи только участными, привели к образованию мелкозернистого гранита и двуслюдяного гранита типа Шатопонсак. Однако, привнос урана и кристаллизация уранинита имели место, в остаточных от гранито-гнейса септах или, по меньшей мере, в зонах близких к контакту с двуслюдяным гранитом Сэн-Сильвестра, где влияние этой гранитизации было наиболее явно выражено.

Эти характеристики урана, в виде следов в гранитах массива Сэн-Сильвестр, определяют геохимический контекст, с которым связаны внутригранитные урановые месторождения запада Центрального массива (Франция).

INTRODUCTION

Dans le cadre du programme de recherches réalisé en commun par le Commissariat à l'Energie Atomique (C.E.A.) et le Centre de Recherches Radiogéologiques de Nancy (C.R.R.), la présente étude est une mise au point sur une partie des travaux effectués dans le Massif de Saint-Sylvestre, qui contient les principaux gisements d'uranium exploités du Limousin. Son but est d'établir les variations de la teneur et du mode de répartition de l'uranium à l'intérieur de la roche saine profonde pour les différents granites qui composent le massif. A cet effet, il a été utilisé uniquement des échantillons prélevés dans les travers-bancs stériles des mines ou dans la partie profonde de différents sondages, au-dessous de la zone oxydée superficielle, ce qui exclut les formes de répartitions secondaires de l'uranium et les perturbations dans les teneurs qui accompagnent l'altération.

En effet, tous les problèmes intéressant la localisation de l'uranium dans les roches éruptives sont grandement clarifiés lorsqu'il est possible de distinguer de façon nette les formes de répartition primaires des formes de répartition secondaires liées à l'altération météorique. M. Roubault et R. Coppens (1959) mirent ainsi en évidence une augmentation considérable de la radioactivité alpha diffuse ou fissurale dans les roches altérées, en accord avec les observations de S.H.U. Bowie (cité par C.F. Davidson, 1951). Dans le granite à deux micas de Saint-Sylvestre, il a été montré qu'une proportion considérable de l'uranium de la roche (65 %) était mise en mouvement au niveau de la zone oxydée superficielle et redistribuée partiellement sur les constituants du complexe d'altération, l'autre partie étant lessivée des roches de surface, ce qui entraîne une baisse de la teneur en uranium par rapport à la roche saine profonde (Barbier et Ranchin, 1968 b). L'importance du remaniement est due essentiellement à l'abondance de l'uraninite qui est oxydée et détruite dans la zone superficielle, alors qu'elle contient 50 % de l'uranium de la roche. G. Neuerburg (1955) et E. H. Hamilton (1958) ont décrit également une perte d'uranium dans les roches altérées, et, comme l'a souligné G. Neuerburg, c'est évidemment le mode de répartition de l'uranium qui détermine la quantité de cet élément qui pourra être modifiée lors de l'altération.

Dans une certaine mesure, cette influence de l'altération peut expliquer les divergences constatées dans les proportions respectives des différentes formes sous lesquelles l'uranium apparaît dans les granites, telles qu'elles sont données par les auteurs. De nombreux travaux ont été consacrés en effet à ce problème de la localisation de l'uranium dans les roches éruptives : les principaux résultats en sont exposés dans différentes études à caractère synthétique notamment celles de E. Picciotto (1950), M. R. Klepper et D. G. Wyant (1955), E. S. Larsen Jr, G. Phair, D. Gottfried et W. L. Smith (1955), G. Neuerburg (1955), L. V. Tauson (1956), R. Coppens (1957), I. Hayase (1957), M. Roubault et R. Coppens (1957, 1959), L. L. Leonova et L. V. Tauson (1958), A. Ya. Krylov et L. Ya. Atrashenok (1959), G. Jurain (1962). A l'uranium inclus dans les minéraux accessoires usuels radioactifs (zircon, monazite, xénotime, allanite) ou lié à des minéraux d'uranium (uraninite, brannérite), il est opposé généralement

un uranium facilement lessivable et entraîné par les acides dilués, dont la majeure partie est considérée comme étant liée par adsorption aux surfaces cristallines et aux produits d'altération ou disséminée dans les minéraux cardinaux et essentiels.

Les grands ensembles granitiques qui composent le massif de Saint-Sylvestre ont été dégagés par M. Chenevoy (1958), et, récemment, une étude pétrographique et géochimique détaillée du massif a été présentée (Barbier et Ranchin, 1968 a). Par ailleurs, une synthèse des travaux géologiques effectués par le C.E.A. dans le Limousin vient d'être réalisée par Ch. Marquaire et M. Moreau (1968). La partie ouest du massif est constituée par un granite gneissique à biotite et sillimanite (granite de la Brame), auquel sont associés très étroitement des granites à grain fin à deux micas qui ont sensiblement la même composition chimique (granite de Chateauponsac). Le granite à deux micas de Saint-Sylvestre, à texture équantée et à grain généralement grossier forme la partie orientale du massif. Il s'individualise très nettement du granite orienté par son évolution chimique à tendance sodique qui accompagne une albitisation des feldspaths potassiques, et par son cortège d'éléments rares. Il présente de la sorte une zonalité pétrographique, géochimique, métallogénique, avec à l'Est une zone albitisée enrichie en Na, Si, Sn, Cu, Au et contenant des pegmatites sodolithiques lithinifères, et à l'Ouest une zone à albitisation faible enrichie en Fe, Mg, Ti, Ca, K, Ba, Sr et contenant des pegmatites potassiques à beryl. Les gisements d'uranium sont localisés dans la partie ouest du granite à deux micas de Saint-Sylvestre. Le granite de cette zone a fait l'objet d'études très approfondies, et il servira comme modèle de base dans nos études sur les variations de la géochimie de l'uranium, non seulement pour l'ensemble du massif de Saint-Sylvestre, mais aussi dans nos travaux ultérieurs sur les granites des régions voisines.

Dans la première partie de cette étude, on considérera tout d'abord les variations de la teneur en uranium dans la partie ouest du granite de Saint-Sylvestre, c'est-à-dire dans un faciès homogène, ainsi que les modalités de répartition de l'uranium dans cette roche. Le problème des variations géochimiques de l'uranium en liaison avec les différents granites qui composent le massif fera l'objet de la seconde partie de cette étude.

I - LA GÉOCHIMIE DE L'URANIUM

DANS LA PARTIE OCCIDENTALE DU GRANITE A DEUX MICAS DE SAINT-SYLVESTRE

A — VARIATIONS PRIMAIRES DE LA TENEUR EN URANIUM DANS UN FACIÈS HOMOGÈNE PROBLÈME DES GRADIENTS — REPRÉSENTATIVITÉ D'UN SONDAGE

Si dans le granite à deux micas de Saint-Sylvestre les conditions sont extrêmement favorables pour l'étude du granite en profondeur, en raison des nombreuses mines qui comportent des zones stériles saines et grâce aux sondages effectués dans le cadre

de cette opération de recherche fondamentale, il n'en sera pas toujours ainsi à l'avenir. Dans le cas général, on disposera tout au plus d'un sondage, ou de quelques rares carrières en exploitation ayant toutes les garanties voulues. Dans cette perspective, il faut s'interroger sur la représentativité d'une teneur déterminée en un point dans un massif granitique homogène et essayer de répondre à un certain nombre de questions :

— La teneur en uranium reste-t-elle constante dans un sondage court (15-25 m en roche saine) ?

— Sur quelle distance une teneur déterminée en un point demeure-t-elle valable ? En réalité, les échantillonnages existant nous permettront seulement d'étudier les variations de la teneur en uranium sur des distances de l'ordre de 30, 50, 80, 500 et 700 m.

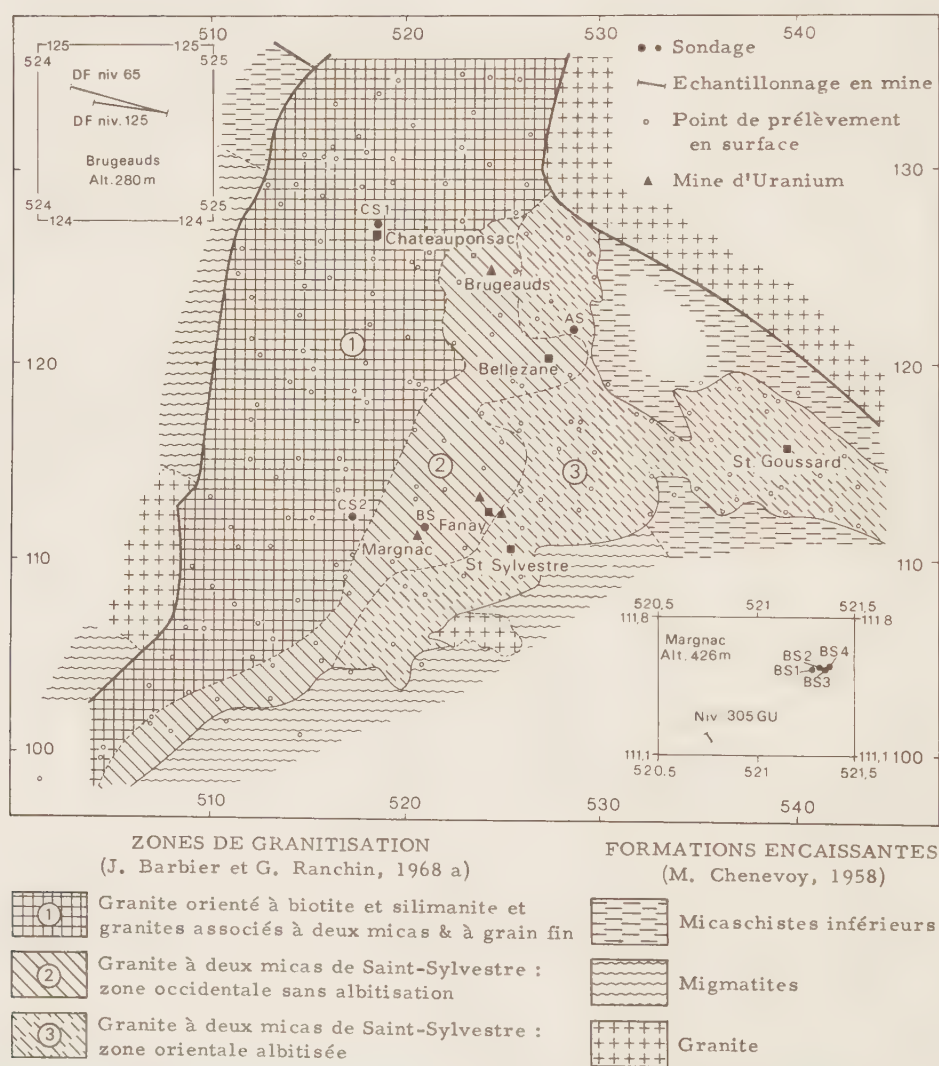


FIG. 1. — Carte géologique du Massif de Saint-Sylvestre.
Localisation des échantillonnages profonds en roche saine (mines et sondages).

— Le faciès considéré présente-t-il une variation régionale, et quelle est la teneur ou la gamme de teneurs qui le caractérise ?

Pour répondre à ces questions, on dispose de deux groupes d'échantillonnages situés pratiquement aux extrémités opposées de la zone étudiée (fig. 1) :

— Les échantillonnages de la Mine des Brugeauds au Nord (DF), effectués aux niveaux 65 et 125;

— Les échantillonnages de la région de Margnac, au Sud, comprenant : un prélèvement de 500 kg (GU) effectué au niveau le plus profond de la Mine de Margnac (N 305), quatre sondages (BS 1 à BS 4) situés au Nord-Est de la mine de Margnac. Entre ces sondages et le précédent échantillonnage, la distance horizontale est environ de 700 m. Les sondages sont sensiblement alignés sur un profil WSW-ENE et espacés de 25 à 30 m, dans une zone à forte résistivité où les effets de l'altération superficielle ne se font sentir que jusqu'à une quinzaine de mètres de profondeur. La profondeur de ces sondages varie entre 30 et 50 m.

Dans une précédente étude (Barbier et Ranchin, 1968 b), un certain nombre de résultats analytiques établis grâce à ces échantillonnages ont été présentés. Des modifications survenues dans la méthode de dosage n'avaient pas permis d'effectuer des comparaisons statistiques valables à l'aide de ces données et la plupart des échantillons ont été analysés à nouveau suivant la méthode utilisée par le Service de Géochimie du C.E.A. (Berthollet, 1958). C'est ainsi que l'attaque à l'eau régale a été remplacée par une attaque fluoperchlorique, et l'extraction par voie chimique remplacée par une extraction sur papier chromatographique à l'aide d'un solvant. Le papier est grillé et le résidu fixé par fusion sur une pastille de flux (900 g de Na_2CO_3 pour 100 g de Na - F). Le dosage de l'uranium est effectué comme auparavant avec un fluorimètre type C.E.A.

1 — CALCUL DE L'ERREUR ANALYTIQUE

Une connaissance précise de la dispersion analytique liée à la méthode de dosage est nécessaire lorsqu'on veut étudier des variations fines de la teneur en uranium. Comme la dispersion et, par voie de conséquence, l'écart-type de l'erreur analytique augmentent nécessairement avec la valeur de la moyenne, on utilisera le coefficient de variation $V = \sigma/m$.

A chaque série de 9 échantillons disposés sur un tourniquet lors de la fusion avec la pastille de flux, il a été adjoint un échantillon de contrôle constitué uniformément par le même granite (GR). L'ensemble des valeurs obtenues avec ce granite permet d'apprécier la dispersion analytique.

Une autre manière de calculer le coefficient de variation analytique est d'effectuer plusieurs séries d'analyses successives du même échantillon. C'est ce qui a été fait avec un échantillon obtenu à partir du prélèvement de 500 kg effectué au niveau le plus profond de Margnac et soigneusement homogénéisé (GU).

Les résultats analytiques sont reportés sur le tableau 1.

Granite de référence	Valeur minimale	Valeur maximale	Moyenne m (en $\mu\text{g/g}$)	Ecart-type σ	$v = \frac{\sigma}{m}$	Nombre d'analyses	Test du χ^2 (χ^2_s pour $s = 0,05$)
G R	5,70	7,60	6,26	0,41	0,09	55	$\chi^2 = 1,06$ ($\chi^2_s = 11,07$)
G U (Margnac niveau 305)	16,90	23,90	20,51	1,87	0,07	47	$\chi^2 = 6,83$ ($\chi^2_s = 9,49$)

TABLEAU 1. — Erreur analytique de la méthode de dosage de l'uranium.

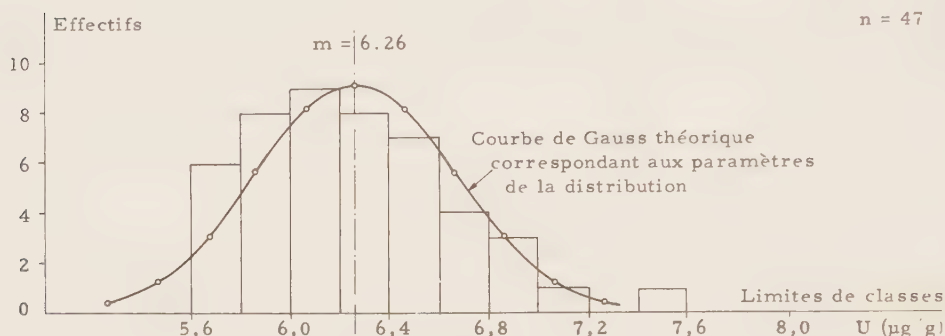


FIG. 2. — Histogramme des teneurs en uranium dosées dans le granite de référence GR.

Un échantillon témoin a été incorporé dans chaque série de 9 analyses.
n : nombre d'échantillons.

Pour chacune des deux distributions, le test du χ^2 permet de ne pas rejeter la spécification normale, mais l'examen de la forme des histogrammes montre que seul celui du granite GR peut être valablement ajusté à une loi normale (fig. 2 et 3).

Le coefficient de variation correspondant à l'erreur analytique est un peu inférieur à 0,10 (0,09 pour GR; 0,07 pour GU).

2 — VARIATIONS DE LA TENEUR EN URANIUM DANS UN SONDAGE COURT

Les sondages ont été échantillonnés et analysés de façon continue, un échantillon correspondant à 50 cm de la demi-carotte obtenue par sciage longitudinal. Les résultats analytiques des trois sondages BS 1, BS 2, BS 4, qui sont donnés dans le tableau 2, correspondent à une hauteur de carotte de 12 à 15 m dans la partie saine profonde des sondages.

Le coefficient de variation obtenu avec les séries des échantillons BS 2 et BS à n'est pas supérieur à 0,10. Le test du χ^2 et la forme des histogrammes indiquent que la distribution est normale (fig. 3). Pour les échantillons de BS 1, le coefficient de variation V est un peu plus élevé (0,13), mais ce sondage comporte de nombreux passages fissurés et altérés qu'il est difficile d'éliminer complètement et qui sont susceptibles d'entraîner des perturbations secondaires dans les teneurs.

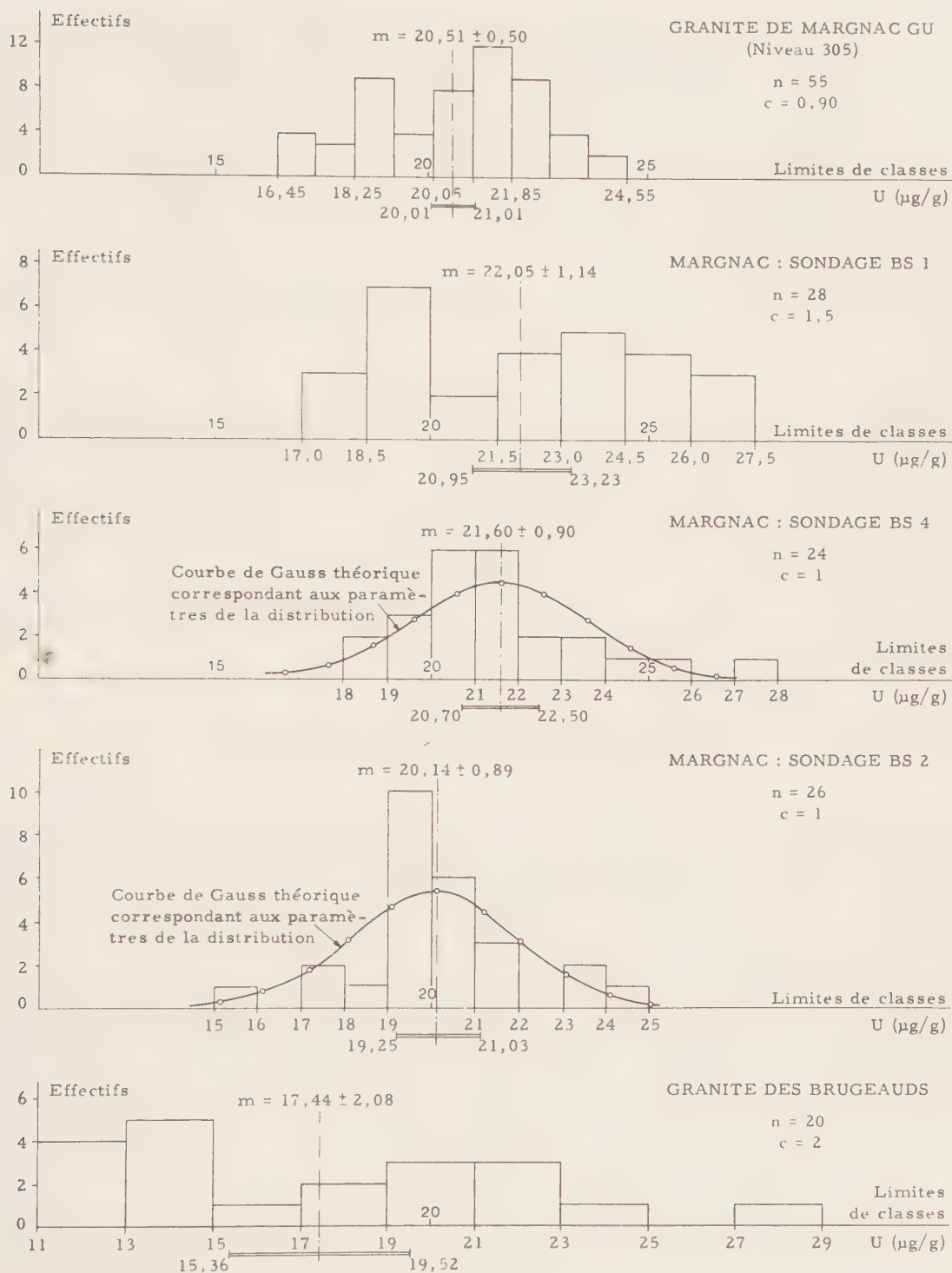


FIG. 3. — Granite à deux micas de Saint-Sylvestre (zone occidentale). Répartition des teneurs en uranium dans la partie saine des sondages et des travers-bancs. Les moyennes sont données avec leur intervalle de confiance au seuil $s = 0,05$ %. n : nombre d'échantillons. — c : intervalle de classe.

	Valeur minimale	Valeur maximale	Moyenne m (en $\mu\text{g/g}$)	Ecart-type σ	$V = \frac{\sigma}{m}$	Nombre d'échantillons	Test du χ^2 (χ_s^2 pour $s = 0,05$)
Magnac Sondage BS1 (19 – 33 m)	17,60	26,00	22,09	2,95	0,13	28	$\chi^2 = 4,78$ ($\chi_s^2 = 9,488$)
Magnac Sondage BS2	15,60	24,50	20,14	1,95	0,097	26	$\chi^2 = 8,60$ ($\chi_s^2 = 9,488$)
Magnac Sondage BS4	18,65	27,30	21,60	2,16	0,10	24	$\chi^2 = 4,08$ ($\chi_s^2 = 12,592$)
Les Brugeauds DF	11,90	27,70	17,44	4,45	0,26	20	$\chi^2 = 4,94$ ($\chi_s^2 = 9,488$)

TABLEAU 2. — Granite à deux micas de Saint-Sylvestre.
Teneurs (en $\mu\text{g/g}$) en uranium de la roche saine profonde.

Il faut donc conclure que dans ces sondages courts, sur une hauteur de 12 à 15 m, les variations de la teneur en uranium ne sont pas supérieures aux écarts analytiques. Autrement dit, analyser n échantillons représentant 12 à 15 m de sondages, chaque échantillon ayant une longueur de 50 cm, revient à analyser n fois un même échantillon de 50 cm. Il suffirait donc pour obtenir la teneur de la roche saine en ces points de prendre un nombre réduit d'échantillons, avec pour chacun un nombre de mesures qui dépendraient de la précision souhaitée.

La teneur en uranium est donc homogène vis-à-vis de la méthode de dosage, autrement dit les variations, s'il en existe, ne sont pas décelables par la méthode utilisée.

3 — VARIATIONS DE LA TENEUR EN URANIUM SUR LES DISTANCES COURTES (1 000 m)

Le problème de la variation de la teneur en uranium sur des distances courtes peut être abordé par la comparaison des moyennes déterminées avec précision dans les sondages BS 1, BS 2, BS 4, distants respectivement de 30 m pour BS 1 et BS 2, 50 m pour BS 2 et BS 4 et 80 m pour BS 1 et BS 4. Pour les distances de l'ordre de 700 m, les résultats de ces sondages seront comparés à la teneur moyenne du granite prélevé au niveau 305 de Magnac.

Dans le cas de populations normales dont le test de Snédécór avait démontré l'identité des variances, pour juger de la signification des différences observées dans les moyennes, on a utilisé la variable t qui suit une loi de Student-Fisher correspondant au nombre de degrés de liberté $v = n_1 + n_2 - 2$:

$$t = \frac{(m_1 - m_2)}{\sqrt{V^*/n_1 + V^*/n_2}}$$

où V^* est la variance commune estimée des deux populations. Si les moyennes sont égales, t doit être comprise dans l'intervalle $(-t_s, +t_s)$ donné par la table de Student-Fisher et correspondant au seuil de probabilité s choisi (en l'occurrence 0,05).

Pour comparer des populations qui ne sont pas normales, on a utilisé la variable :

$$t = \frac{(m_1 - m_2)}{\sqrt{\sigma_1^2/n_1 + \sigma_2^2/n_2}}$$

dont la valeur doit être comparée à l'intervalle d'acceptation donné par la table de la loi normale réduite en fonction du seuil de probabilité choisi (- 2,58 à + 2,58 au seuil 0,99; - 1,96 à + 1,96 au seuil 0,95). Si la valeur calculée est supérieure à l'un de ces chiffres, la différence est significative au seuil correspondant. Pour pouvoir appliquer le test, il faut que n_1 et n_2 soient égaux au moins à une trentaine, de manière à ce que les écarts-types observés soient des estimations valables des écarts-types réels dans chacune des deux distributions (Morice et Chartier, 1954). Cette condition est remplie par tous nos échantillonnages, sauf celui des Brugeauds pour lesquels $n = 20$ ⁽¹⁾.

Les moyennes des teneurs sont reportées dans les tableaux 1 (GU) et 2 (BS 1, BS 2, BS 4), et les résultats des tests de comparaison dans le tableau 3.

Valeur des variables : $t = \frac{m_1 - m_2}{\sqrt{V_1/n_1 + V_2/n_2}}$						Granite à deux micas de Saint-Sylvestre
ou $t = \frac{m_1 - m_2}{\sqrt{V^*/n_1 + V^*/n_2}}$.						
(la valeur de t_s pour $s = 0,05$ est alors reportée).						
			2,54	0,67		
			($t_s = 2,012$)	($t_s = 2,010$)		
			2,32	0,82		
			($t_s = 1,99$)	($t_s = 1,99$)		
				2,59		
						Margnac BS2
						Margnac BS4
						Margnac GU
						Les Brugeauds DF
						Granite de Chateauponsac CS1
						Granite de la Brame CS2
					</	

TABLEAU 3. — Teneurs moyennes en uranium de la roche saine profonde dans les différents granites du Massif de Saint-Sylvestre : signification statistique des différences observées.

Pour les trois sondages BS 2, BS 4, BS 1, les moyennes s'échelonnent sensiblement entre 20 et 22 $\mu\text{g/g}$. Quoique faibles, les différences constatées entre les moyennes des échantillonnages BS 1 et BS 2 d'une part, BS 2 et BS 4 de l'autre, sont significatives. Par contre, les moyennes des échantillonnages BS 4 et BS 1 peuvent être considérées comme identiques. Sur de courtes distances (30, 50, 80 m), il peut donc y avoir de légères différences entre les teneurs déterminées avec exactitude en différents points, mais cela n'est pas toujours le cas.

La teneur moyenne obtenue pour le granite de Margnac GU (20,51 $\mu\text{g/g}$) à environ 500 m des sondages BS, s'intercale entre les valeurs précédentes. A l'échelle du kilomètre, le granite présente donc une homogénéité d'ensemble quant à sa teneur en uranium, ce qui n'exclut pas de petites variations à caractère accidentel probable.

(1) Pour cette raison, dans le tableau 3, les résultats des tests où cet échantillonnage intervient sont suivis d'un point d'interrogation.

4 — VARIATIONS DE LA TENEUR EN URANIUM POUR L'ENSEMBLE DU FACIÈS CONSIDÉRÉ

Il faut maintenant considérer les résultats analytiques de l'échantillonnage DF des Brugeauds dans la région nord et les comparer à ceux des échantillonnages de la région de Margnac (tabl. 2 et 3).

Dans la mine des Brugeauds, bien que plus de 150 échantillons aient été prélevés, il a été cependant impossible d'obtenir une série de prélèvements systématiques qui soit entièrement en roche saine. Pour avoir une teneur moyenne qui soit représentative de ce secteur, seuls ont été considérés dans les différentes séries les échantillons sains dont la perte au feu (à 950°) est inférieure à 1 %, ce qui représente une vingtaine de résultats utilisables. Ceci correspond à une sorte d'échantillonnage au hasard sur une distance horizontale de 500 m et à deux niveaux différents (65 et 125).

Le coefficient de variation est élevé ($\sigma/m = 0,26$). Par conséquent, les variations de la teneur en uranium sont supérieures aux fluctuations analytique. Même si des perturbations secondaires toujours difficiles à éviter dans un échantillonnage en travers-bancs sont intervenues, compte-tenu du choix des prélèvements et de leur état de fraîcheur, ceci semble bien montrer que sur une distance de 500 m la teneur en uranium peut subir des variations. Il faut remarquer cependant que le granite des Brugeauds est assez hétérogène, avec notamment des résidus gneissiques mélanocrates, des passées microscopiques à sillimanite qui évoquent le granite de la Brame, des faciès à grain fin, etc. Les prélèvements ont été pris exclusivement dans le granite banal, mais la présence de ces enclaves révèle que l'homogénéisation est bien imparfaite, ce qui influe certainement sur le granite lui-même.

La moyenne de l'échantillonnage des Brugeauds (17,44 $\mu\text{g/g}$) est inférieure à celle des échantillonnages de la région de Margnac. Toutes les différences observées peuvent être considérées comme significatives, malgré le petit nombre de prélèvements ($n = 20$) utilisés pour caractériser le granite des Brugeauds.

Il faudrait évidemment des échantillonnages en position intermédiaire pour conclure à une variation régionale de la teneur suivant la direction Nord-Sud. Compte-tenu des caractéristiques pétrographiques du granite des Brugeauds, l'homogénéité de faciès par rapport au granite de Margnac apparaît par ailleurs comme toute relative.

5 — CONCLUSIONS

Le problème de la variation de la teneur en uranium dans un faciès granitique homogène sur des distances courtes a déjà été étudié par L. L. Leonova et O. S. Renne (1964), principalement sur le massif de Khantass (Kazakhstan) où une trentaine d'échantillons ont été prélevés sur une surface d'environ 10 ares. La teneur moyenne en uranium est égale à 2,4 $\mu\text{g/g}$. Les auteurs arrivent à la conclusion que l'uranium, ainsi que le thorium, sont distribués de façon uniforme dans l'aire considérée. Ce résultat est intéressant à signaler, même si cette étude est difficilement comparable

à la notre. En effet, les échantillons, bien que non altérés, ont été prélevés en surface, et il s'agit par ailleurs d'un granite à teneur très faible. Pour cette dernière raison, il est probable que les perturbations provoquées par l'altération sont moins marquées.

Dans le cas étudié ici, du granite à deux micas de Saint-Sylvestre, seule la détermination précise de la teneur locale en uranium à l'aide d'un sondage ou d'un échantillonnage minier a permis de mettre en évidence une tendance à l'homogénéité qui, si elle n'est pas parfaite, est tout de même assez remarquable. Dans la zone étudiée, le granite est caractérisé ainsi par une gamme de teneurs qui s'échelonnent entre 17,40 et 22 $\mu\text{g/g}$.

Les résultats obtenus permettent de fixer les conditions d'échantillonnage profond dans le type de granite étudié et avec le procédé d'analyse utilisé. C'est ainsi que, dans un sondage, les variations observées ne sont pas supérieures aux écarts analytiques. Par ailleurs, on peut affirmer que jusqu'à des distances de l'ordre de 1 000 m, et lorsqu'il n'y a pas d'hétérogénéité de faciès semblable à celle observée dans la région des Brugeauds, le granite présente une teneur en uranium sensiblement constante, avec cependant de petites variations qui paraissent bien être accidentelles.

Dans la région de Margnac, les teneurs qui ont été déterminées varient de la sorte entre 20 et 22 $\mu\text{g/g}$, soit un écart maximum qui n'excède pas 10 %. Au demeurant, il est logique de conclure que pour l'ensemble du faciès étudié, un seul sondage ou échantillonnage profond donnerait une bonne indication sur la teneur de la roche saine profonde.

B — LOCALISATION DE L'URANIUM DANS LE GRANITE A DEUX MICAS DE SAINT-SYLVESTRE

L'étude de la localisation de l'uranium a été faite sur de très nombreux échantillons (environ 500) provenant des sondages ou des prélèvements dans la roche saine stérile en mine. La méthode utilisée fait appel essentiellement à deux techniques :

— l'étude de la répartition de la radioactivité α par la méthode des plaques nucléaires (autoradiographie), avec évaluation de la teneur en éléments radioactifs des minéraux suivant la méthode de R. Coppens (1949);

— l'étude des minéraux radioactifs à la microsonde électronique.

Dans l'utilisation de cette dernière technique, nous avons bénéficié des travaux de mise au point effectués par J. Goni (1966) pour l'étude de la localisation des éléments à l'état de traces. Notamment, l'observation a été faite sur des lames minces polies fabriquées à l'aide d'abrasifs très fins. Le polissage final est effectué avec une poudre diamantée de 3 microns puis avec une poudre de 1 micron. Ces lames minces polies peuvent être utilisées pour l'observation en lumière réfléchie dans le cas de minéraux opaques, et, après métallisation, pour l'étude à la microsonde électronique.

Nos études ont été faites avec une microsonde CAMECA installée au Centre Scientifique et Technique du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.) à Orléans - La Source. Les modalités d'utilisation de cet appareil ont été décrites de façon détaillée par J. Goni (1966). Nous en rappellerons simplement les principales possibilités techniques :

— image électronique faisant apparaître les variations du nombre atomique moyen dans la plage considérée et par voie de conséquence les différences de constitution. L'image est dite positive lorsque les zones où le courant est absorbé le plus intensément sont brillantes; lorsque l'effet inverse est obtenu, l'image est dite négative;

— analyse qualitative ponctuelle, à l'échelle du micron. Dans le cas le plus favorable, c'est-à-dire la recherche d'éléments lourds dans une matrice légère, la microsonde électronique peut déceler un élément dont la teneur est de 600 $\mu\text{g/g}$;

— dosage quantitatif ponctuel (à partir d'une teneur de 300 $\mu\text{g/g}$);

— image semi-quantitative de la répartition d'un élément grâce à un dispositif de balayage automatique dont est munie la microsonde.

La microsonde CAMECA utilisée ne permet pour l'instant d'étudier que les éléments de nombre atomique supérieur au sodium ($Z = 11$).

1 — GÉNÉRALITÉS

RAPPEL DES CONNAISSANCES ACQUISES

SUR LE GRANITE A DEUX MICAS DE SAINT-SYLVESTRE

Les minéraux radioactifs décelés par autoradiographie et susceptibles de contenir de l'uranium forment trois groupes distincts :

— inclusions d'uraninite et quelques autres minéraux opaques rares;

— minéraux accessoires transparents : ce sont la monazite, le zircon et l'apatite. Dans le granite à deux micas de Saint-Sylvestre, la radioactivité de l'apatite est extrêmement faible, mais ce minéral est entouré néanmoins par une auréole pléochroïque brune lorsqu'il est inclus dans la biotite;

— agrégats associés aux biotites et paraissant constitués essentiellement par du rutile.

En fait, l'essentiel de la radioactivité α visible sur les plaques nucléaires est liée aux cristaux d'uraninite dont les caractéristiques principales (formes, dimensions, localisation et composition) ont été données par une précédente étude (Barbier et Ranchin, 1968 b). On rappellera que ces cristaux sont de petite taille (27 à 50 microns), le plus souvent de forme octaédrique, et qu'ils sont en inclusion dans tous les minéraux du granite. La biotite et la muscovite contiennent environ la moitié des cristaux d'uraninite, l'autre moitié étant répartie entre le quartz, l'apatite, les plagioclases et les feldspaths potassiques. La biotite est le minéral le plus riche en inclusions d'uraninite. Les dosages effectués à la microsonde électronique ont révélé que la teneur en uranium des cristaux était de 80-82 % et la teneur en plomb de 3-4 % (tabl. 7).

Le lessivage de la roche broyée et porphyrisée par l'acide chlorhydrique dilué (1 N) apporte des indications assez précises sur les proportions respectives d'uranium contenu dans les différents groupes de minéraux. Deux lessivages sont effectués sur papier filtre Schleicher bande noire à l'aide de 10 cc d'acide chlorhydrique 1 N : par convention, l'uranium qui n'est pas entraîné par ces lessivages est appelé « uranium fixé ». De multiples essais effectués sur le granite à deux micas de Saint-Sylvestre ont révélé que la proportion d'uranium entraîné était seulement de 20 à 25 % dans la roche saine. Dans l'étude citée précédemment, nous avons montré que dans

la zone d'altération commençante, après la destruction de l'uraninite, cette proportion s'élevait à 70-75 %, l'uranium libéré ayant précipité sous forme d'autunite dans les fissures.

De ces essais, on peut conclure que la roche saine contient environ 20 % d'uranium facilement lessivable, et 80 % d'uranium dit « fixé » réparti entre l'uraninite (environ 50 %) et les minéraux accessoires transparents (environ 30 %), essentiellement la monazite et le zircon. Les expériences effectuées par A. Ya. Krylov et L. Ya. Atrashenok (1959) montrent bien en effet que les lessivages faibles n'entraînent qu'une très petite part de l'uranium contenue dans les zircons et la monazite. On sait par ailleurs que l'uraninite se dissout très difficilement sans oxydation dans les acides (Garrels et Christ, 1959).

Cette évaluation n'est qu'approchée, et nous serons amenés à revenir sur certains points, notamment sur la nature de l'uranium facilement lessivable. Mais ce travail a surtout pour but l'étude de l'environnement auréolaire des cristaux d'uraninite avec la mise en évidence des éléments qui leur sont associés. C'est en quelque sorte l'étude de la paragenèse de l'uraninite. Nous présenterons à cet effet l'ensemble des travaux effectués à l'aide de la microsonde électronique⁽¹⁾. La plupart portent sur les cristaux d'uraninite, mais un certain nombre d'analyses intéressent les autres minéraux contenant de l'uranium.

2 — L'ENVIRONNEMENT AURÉOLAIRE DES CRISTAUX D'URANINITE MINÉRAUX ET ÉLÉMENTS ASSOCIÉS

L'analyse même des cristaux d'uraninite à la microsonde électronique a permis de déceler l'uranium, le plomb et dans un cas le thorium (tabl. 7). Ceci ne signifie pas que l'uraninite ne contienne pas d'autres éléments à des teneurs faibles car, s'il en existe, leur rayonnement est absorbé facilement par cette matrice très lourde. Les images de l'uranium et du plomb révèlent que la répartition de ces éléments à l'intérieur des cristaux est homogène (Pl. I). Dans un cas cependant (Pl. I, fig. 3 b), la partie centrale du cristal est plus riche en uranium, mais la différence s'avère faible (83 % contre 80,8 %).

Les minéraux radioactifs tels que le zircon et la monazite, lorsqu'ils sont inclus dans la biotite, sont entourés par une auréole pléochroïque brune provoquée par l'émission des rayons α . Autour des cristaux d'uraninite, les transformations subies par le minéral-hôte sont beaucoup plus prononcées, et immédiatement autour du cristal apparaît une auréole d'altération qui est elle-même entourée par l'auréole pléochroïque brune lorsque l'uraninite se trouve incluse dans la biotite. Ces auréoles complexes sont très caractéristiques, et elles permettent de repérer les cristaux d'uraninite malgré leur petite taille lorsqu'on ne dispose pas de plaques nucléaires. Les environnements auréolaires des cristaux d'uraninite ont un aspect assez différent suivant la nature du minéral-hôte, et il nous a paru intéressant de les étudier de façon systématique à la microsonde électronique, avec l'espoir en particulier de trouver des associations d'éléments qui soient communes à ces différentes auréoles.

(1) Les différentes analyses à la microsonde électronique ont été effectuées par MM. R. Giraud, F. Obrecht et C. Monnier, du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, à Orléans - La Source.

Dans certains cas cependant, qui seront étudiés en premier, l'uraninite n'est pas en contact direct avec un des minéraux cardinaux ou essentiels du granite. Elle est alors incluse dans de la pyrite ou entourée d'une gangue ferrugineuse.

a) URANINITE INCLUSE DANS LA PYRITE

Cette association n'est pas une curiosité, mais elle n'est pas non plus très fréquente. Elle est aussi distribuée très irrégulièrement. Si on considère une succession de lames minces fabriquées à partir d'échantillons prélevés à intervalles réguliers dans un sondage (tous les 50 cm), il arrive que l'uraninite soit incluse systématiquement dans la pyrite à l'intérieur d'un certain nombre de ces lames, alors que cela ne se reproduit plus dans le restant du sondage.

Si les cristaux d'uraninite inclus dans la pyrite ont des formes géométriques nettes, ce n'est pas toujours le cas pour la pyrite elle-même comme le montrent les photographies de la planche I (fig. 1). Sur l'une d'entre elles notamment (fig. 1 b-c), l'uraninite apparaît au milieu d'une plage de pyrite informe; de la pyrite emplit par ailleurs le champ fissural de l'uraninite. Lorsque cette association est localisée dans la biotite, la pyrite s'entoure d'une auréole pléochroïque brune due à l'émission de rayons α par l'uraninite. En effet, la pyrite elle-même n'est pas radioactive. La distance entre l'uraninite et la partie externe de l'auréole brune n'excède d'ailleurs pas 35 microns, ce qui correspond bien aux rayons α de plus long parcours émis par la famille de l'uranium, c'est-à-dire ceux du Radium C'.

L'analyse de la pyrite à la microsonde électronique révèle qu'elle contient du cobalt et du calcium.

L'uraninite est toujours en inclusion dans la pyrite; l'inverse n'a jamais été observé.

b) URANINITE ENFERMÉE DANS UNE GANGUE FERRUGINEUSE

De telles associations ont surtout été observées dans la zone d'altération commençante où l'oxydation du fer les rend particulièrement visibles. Elles se présentent alors sous forme d'amas rougeâtres à radioactivité faible résiduelle car l'uraninite a été détruite en totalité ou en partie. Dans les deux exemples étudiés, l'uranium qui a été retenu dans cette « éponge » ferrugineuse est associé à du phosphore et à du calcium (Pl. II) : à l'intérieur de cet amas ferrugineux, la transformation de l'uraninite en autunite s'est donc faite *in situ*. Au départ, nous avons eu tendance à considérer ces amas ferrugineux rougeâtres comme de simples produits de substitution formés à l'emplacement des cristaux d'uraninite. Leur étude à la microsonde électronique révèle que dans leur aspect actuel ils sont le résultat de l'oxydation d'une gangue en partie ferrugineuse associée à l'uraninite et dont la composition est très complexe. Sur la planche II, les images de répartition des éléments décelés par l'analyse qualitative montrent ainsi un certain nombre d'associations très caractéristiques.

Généralement, dans la partie externe de la zone ferrugineuse, mais toujours à l'intérieur de celle-ci, il apparaît une association P—Ca—Zr. Sur une des plages, on a décelé du zinc situé en position plus interne, autour de l'uranium. Sur l'autre plage,

des terres rares (Ce, La, Ne) et du thorium sont associés au phosphore, au calcium et au zirconium. Dans les deux plages, du carbone ⁽¹⁾ a été décelé dans la partie ferrugineuse (bien que l'image en soit donnée seulement pour la première).

La zone ferrugineuse est entourée d'une auréole phylliteuse (association Si, Al, K) : ce peut être de la muscovite ou un mica lithinifère, le lithium n'étant pas décelable.

Les images de répartition des éléments révèlent qu'ils sont disposés en auréoles concentriques successives autour des anciens cristaux d'uraninite. S'il est possible que le zinc provienne de l'altération de la biotite située au contact, les autres éléments représentent de toute évidence une paragenèse primaire accompagnant l'uranium. Il ne semble pas que la plupart d'entre eux soient exprimés sous forme de minéraux, ce qui n'est d'ailleurs pas rare s'agissant d'éléments à l'état de traces (Goni, 1966); de plus, cette zone a été soumise depuis la cristallisation de l'uraninite à un bombardement intense par rayons α .

Il est intéressant de remarquer, sur un autre sujet, que l'environnement des cristaux d'uraninite contient du phosphore et du calcium susceptibles d'être utilisés immédiatement pour la formation d'autunite, dont on sait qu'elle est très abondante dans la zone d'altération commençante.

c) URANINITE INCLUSE DANS LES PLAGIOCLASES

A l'intérieur des plagioclases, l'uraninite est entourée par une auréole très distincte où il est possible de reconnaître des phyllites sériciteuses, des oxydes de fer et des carbonates.

Sur une des plages de la planche III (fig. 1 c), il a été fait deux analyses qualitatives à la microsonde électronique, la première dans le plagioclase à l'extérieur de l'auréole, la seconde dans l'auréole. Sur le premier enregistrement, seuls sont apparus les pics de Si, Al et Ca (Na n'est pas décelable). Le second enregistrement révèle la présence d'éléments spécifiques de l'auréole : K (séricite), P, Zr, Mn, Zn, Mg. Le pic du calcium est aussi plus marqué. Au contraire, ceux de Si et Al sont plus petits.

Certains des éléments qui apparaissent ici dans l'auréole avaient déjà été observés dans l'étude précédente : le phosphore, le zirconium, le calcium, le potassium qui entre dans la composition de la séricite, et aussi le zinc dont il semble bien qu'il soit lui aussi primaire.

L'environnement auréolaire des cristaux d'uraninite inclus dans les feldspaths potassiques paraît semblable à celui observé dans les plagioclases.

d) URANINITE INCLUSE DANS LA BIOTITE

Dans la biotite également, les environnements auréolaires sont très caractéristiques. Autour du cristal d'uraninite, la biotite est chloritisée, avec souvent une

(1) L'image du carbone a été réalisée par M. R. Giraud avec la microsonde électronique de l'Ecole des Mines de Paris.

bordure interne blanchâtre et, succédant à l'auréole chloritisée, une auréole pléochroïque brune est régulièrement observée. La zone chloritisée peut être presque totalement décolorée (Pl. III, fig. 2 a), ou brouillée partiellement, sans doute par suite des émissions de rayons α (Pl. III, fig. 2 b). Une série d'analyses qualitatives à la microsonde électronique a été effectuée sur cette dernière plage : en s'éloignant du cristal d'uraninite, les enregistrements ont été faits successivement sur la partie interne de l'auréole chloritisée, sur la partie externe de cette auréole, sur l'auréole brune pléochroïque, puis sur la biotite elle-même.

L'enregistrement effectué sur la biotite révèle la présence de Si, Al, K, Mg, Fe, Mn, Ti, Zn (petit pic). Le passage de la biotite fraîche à l'auréole brune est marquée par une diminution des pics de K et Ti. Dans l'auréole chloritisée, les pics de K et Zn disparaissent, ceux de Si, Al, Mg diminuent de façon nette. Par contre, le titane est plus abondant et des éléments nouveaux apparaissent, calcium et zirconium, observés à nouveau dans l'auréole d'un cristal d'uraninite. Le cas du fer n'est pas clair : il paraît moins abondant dans l'auréole chloritisée, mais seuls deux spectrographes sur les quatre utilisés dans un enregistrement complet ont révélé cette tendance.

La distance entre la partie externe de l'auréole brune pléochroïque et le cristal d'uraninite est voisine de 35 μ , ce qui correspond bien au parcours des plus longs rayons α émis par la famille de l'uranium, ceux du Radium C'. Les résultats de l'analyse révèlent que le rayonnement α aurait pour effet essentiellement de déloger le potassium du réseau. Ce phénomène s'accroît dans la zone chloritisée soumise à l'action d'émetteurs plus nombreux. Il faut donc rapporter vraisemblablement cette transformation en chlorite et parfois même cette décoloration à l'action des rayonnements α . Ces auréoles chloritisées ou même décolorées correspondent sans doute aux halos inversés de S. Deutsch (1958). Selon cet auteur l'inversion de la teinte se produit lorsque 15 % des atomes de la biotite sont déplacés.

e) URANINITE INCLUSE DANS LA MUSCOVITE ET LE QUARTZ

Dans la muscovite et le quartz, les effets auréolaires sont beaucoup plus discrets que dans les plagioclases ou la biotite. Dans le quartz même, il n'y a pas de transformations dues à la radioactivité, mais l'uraninite est parfois associée à des phyllites.

Autour des cristaux d'uraninite inclus dans la muscovite, un changement s'est produit dans la teinte de polarisation du minéral hôte, allant généralement dans le sens d'une décoloration. Cette auréole est surtout visible en lumière polarisée (Pl. III, fig. 3 a-b).

Les enregistrements effectués à la microsonde électronique sur la muscovite ont révélé la présence de Si, K, Al, Fe, Mg, Ti.

Dans l'auréole, la quantité de fer est en augmentation; par contre, comme dans les auréoles observées dans les biotites, le potassium est moins abondant et a été en partie déplacé.

f) RÔLE DES PHÉNOMÈNES D'ALTÉRATION DEUTÉRIQUE
DANS LA FORMATION DES AURÉOLES ENTOURANT LES CRISTAUX D'URANINITE

Plus que tous les autres minéraux radioactifs habituels des granites et à l'égal d'un minéral comme la thorite, l'uraninite provoque dans le minéral-hôte des phénomènes auréolaires liés à l'émission des rayons α . Ces phénomènes sont bien sûr très marqués dans la biotite. Toutefois, la radioactivité et l'altération par destruction du réseau du minéral-hôte qui en résulte ne suffisent pas pour expliquer l'existence de nombreux éléments rencontrés presque systématiquement dans les auréoles les plus caractéristiques, notamment celles formées aux dépens des feldspaths et des biotites. Il faut admettre l'existence d'une paragenèse associée à l'uraninite.

Certains des éléments ainsi associés à l'uraninite sont exprimés sous forme de minéraux, le fer et le soufre dans la pyrite, le fer seul dans les gangues ferrugineuses. Il existe aussi dans l'auréole très probablement des carbonates. Une couronne externe phylliteuse, formée sans doute par de la séricite, est très souvent observée. D'autres éléments, les plus réguliers, ne paraissent pas combinés sous forme de minéraux : le phosphore, le zirconium, le calcium en partie, le thorium et les terres rares (Ce, La, Ne), le zinc.

Ces différents éléments, qui sont le plus souvent inconnus dans le minéral-hôte, ne sont pas véhiculés facilement lors des phénomènes d'altération météorique. Ce sont en fait pour la plupart des éléments caractéristiques des pegmatites, au même titre d'ailleurs que l'uraninite dont l'abondance dans le granite à deux micas de Saint-Sylvestre et dans certains granites du même type est tout à fait exceptionnelle. A l'uranium est donc associé tout un cortège d'éléments, dont beaucoup d'éléments rares, et la cristallisation de l'uraninite s'accompagne d'une substitution de ces éléments au minéral-hôte dans l'environnement du cristal formé. L'ensemble de ces phénomènes se place donc vraisemblablement dans une phase d'altération deutérique des minéraux du granite, parmi les phénomènes ultimes de la granitisation.

3 — LES CORPS OPAQUES RADIOACTIFS (AUTRES QUE L'URANINITE)

a) PRODUITS FERRUGINEUX

En dehors de l'uraninite, aucun autre minéral primaire d'uranium n'a été observé. Il existe cependant dans la roche saine des produits opaques contenant de l'uranium, dont l'importance quantitative vis-à-vis des cristaux d'uraninite est très faible. Ils sont cependant intéressants à considérer pour des raisons d'ordre géochimique, et une étude détaillée en a été faite à la microsonde électronique.

Ce sont des associations d'oxyde de fer et d'oxyde d'uranium dont les propriétés optiques sont celles de corps cryptocristallins. D'une dimension comparable aux cristaux d'uraninite (40-60 microns), ces corps opaques radioactifs sont localisés dans les fissures ou les joints. Les images de répartition du fer et de l'uranium montrent que les zones les plus riches en uranium correspondent aux zones où il n'y a pas

de fer, et inversement, mais l'association entre ces deux éléments est néanmoins très nette. L'oxyde d'uranium est emballé en fait dans une gangue ferrugineuse (Pl. IV).

Le plomb radiogénique est évidemment associé à l'uranium. En outre, l'analyse qualitative à la microsonde électronique effectuée dans la zone mixte révèle la présence de zirconium et de phosphore, ce qui est le signe d'une similitude géochimique avec la paragenèse des cristaux d'uraninite.

Les comptages réalisés sur les zones les plus riches en uranium donnent des résultats très irréguliers et ne permettent pas de conclure à l'existence d'un minéral défini. Il s'agit donc bien d'un mélange hétérogène comme l'examen optique le laissait prévoir.

Il est intéressant cependant de donner à titre indicatif les teneurs en uranium et en plomb calculées à partir de ces sondages :

	U %	Pb %
Plage DF 93 (Les Brugeauds)	59,5	3,47
Plage BS 1 27 (sondage Margnac)	73,1	5 %

La quantité de plomb radiogénique associée à l'uranium est comparable à celle qui est contenue dans les cristaux d'uraninite dont ces corps opaques sont très vraisemblablement contemporains, et avec lesquels ils présentent une parenté géochimique certaine. C'est probablement à une coprécipitation du fer et de l'uranium par un mécanisme d'oxydo-réduction lors de la phase deutérique qu'on doit l'existence de ces produits fissuraux.

b) PYRITES RADIOACTIVES

Des pyrites radioactives ont été décrites dans différents granites français par un certain nombre d'auteurs, notamment par G. Jurain (1962) dans les granites des Vosges, par R. Coppens et G. Jurain (1957) et M. Roubault et R. Coppens (1960) dans les granites vendéens. Un cas semblable a été observé dans l'échantillonnage DF des Brugeauds où il a été observé deux petits cristaux accolés de pyrite radioactive (Pl. V, fig. 1).

Les images de répartition du fer, du soufre et de l'uranium, ainsi que l'image électronique rendent parfaitement compte de la constitution de ces cristaux. L'uranium s'est substitué à une partie de la pyrite, d'où la coexistence en lumière réfléchie de zones brillantes correspondant à la partie de la pyrite restée intacte, et de zones noirâtres non réfléchissantes constituées, ici aussi sans doute, par un oxyde d'uranium crypto-cristallin. C'est donc un phénomène de remplacement secondaire provoqué par l'effet réducteur de la pyrite sur un sel d'uranyle en solution.

4 — LES MINÉRAUX ACCESSOIRES TRANSPARENTS RADIOACTIFS

L'apatite est très abondante dans le granite à deux micas de Saint-Sylvestre dont la teneur en phosphore est élevée (0,35 %). Beaucoup de cristaux sont inclus dans la

biotite et la muscovite. Par ailleurs, l'observation microscopique, l'examen autodiagraphique et de nombreuses vérifications rapides à la microsonde électronique ont révélé que les autres minéraux transparents radioactifs, ceux de petite taille ($< 100 \mu$), étaient de la monazite et du zircon. L'absence de xénotime paraît certaine, et c'est certainement une caractéristique des granites de ce type.

a) APATITES

L'apatite contient presque toujours de minuscules inclusions ultra-microscopiques de zircon et de monazite (Pl. V, fig. 2) dont la radioactivité masque celle du minéral-hôte qui, de ce fait, est impossible à évaluer. Cette radioactivité de l'apatite, bien inférieure à celle du zircon et de la monazite, apparaît d'ailleurs comme négligeable et sans commune mesure avec celle d'autres apatites granitiques étudiées par divers auteurs. Par exemple, G. Jurain (1962), pour des apatites d'un granite à amphibole des Vosges, donne des résultats qui s'échelonnent entre 92 et $175^{10-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{s}$, ce qui correspond à des teneurs en équivalent-uranium de 50 à 100 $\mu\text{g/g}$. Les déterminations de la teneur en uranium et en thorium faites par P. M. Hurley et H. W. Fairbairn (1957) sur une trentaine d'apatites provenant de roches granitiques diverses, montrent bien que ces teneurs peuvent être fort variables (entre 5 et 515 $\mu\text{g/g}$ pour l'uranium) (entre 5 et 400 $\mu\text{g/g}$ pour le thorium). Dans le granite à deux micas de Saint-Sylvestre, le meilleur signe de la radioactivité des apatites est encore le halo brun très peu prononcé qui les entoure lorsqu'elles sont incluses dans la biotite. Ce halo est régulier lorsqu'il n'y a pas d'inclusions radioactives en bordure de l'apatite, et, de ce fait, il est probablement dû à la radioactivité propre de ce minéral. Selon les estimations de S. Deutsch (1958), pour produire un halo pléochroïque dans la biotite, il faut une activité accumulée de 10^{14} traces/ cm^2 . Dans le cas des apatites du granite de Saint-Sylvestre, en admettant pour ce granite un âge voisin de 300 millions d'années, cela suppose soit une teneur minimum en uranium de 1 $\mu\text{g/g}$, soit une teneur minimum en thorium de 3 $\mu\text{g/g}$. Etant donné que le halo observé est assez peu prononcé, il est possible que les teneurs en éléments radioactifs de l'apatite ne soient guère supérieures à ces chiffres.

Il faut remarquer enfin que tout l'uranium de l'apatite ne saurait être englobé dans la fraction « uranium fixé » défini après le lessivage à l'acide chlorydrique décinormal. Les lessivages faibles effectués par A. Ya. Krylov et L. Ya. Atrashenok (1959) entraînent environ 20 % de l'uranium contenu dans les apatites, soit une proportion beaucoup plus forte que dans les zircons et les monazites. Par conséquent, une partie de l'uranium des apatites est vraisemblablement entraînée par l'acide chlorydrique dilué, mais la quantité concernée reste cependant très faible.

b) MONAZITES ET ZIRCONS

Les monazites sont plus abondantes que les zircons. Elles ont aussi une radioactivité beaucoup plus marquée. Ce caractère est certainement le meilleur critère pour les distinguer. De plus, les cristaux de zircons ont souvent des formes prismatiques et allongées et sont rarement limpides comme la monazite. Ces minéraux sont généralement inclus dans la biotite.

L'analyse à la microsonde électronique permet de détecter le thorium dans les monazites, et parfois l'uranium, mais aucun de ces deux éléments ne peut être étudié par ce moyen dans les zircons où ils sont à une teneur trop faible. Il se confirme donc que la monazite contient la majeure partie de l'uranium lié aux minéraux accessoires transparents.

L'image de la répartition de l'uranium dans les monazites n'a pu être obtenue à la microsonde électronique, mais celle du thorium montre que cet élément n'est pas réparti de façon homogène dans la masse du cristal. Les images du cérium et du lanthane révèlent par contre une répartition assez uniforme (Pl. VI). Le degré de substitution diadochique du thorium aux autres éléments est donc variable. Ces irrégularités ne sont cependant pas excessives. Dans le cas de la plage BS 4 69(2), la différence de teneur en thorium entre les zones claires et les zones plus sombres est de 1,5 % (Pl. VI, fig. 3; tabl. 4).

	Minéral-hôte	Thorium %		Uranium %
Margnac . LM BS 4 60	Biotite	8,30 %		0,33 %
Margnac . LM BS 4 69 (1)	Biotite	8,90 % (zone riche)		1,7 %
Margnac . LM BS 4 69 (2)	Biotite	8,4 % (zone riche)	6,96 % (zone plus pauvre)	non dosable
Margnac . LM BS 4 67	Biotite	10,27 %		non dosé

TABLEAU 4. — Teneurs en thorium et en uranium des monazites.
Dosages à la microsonde électronique. Analystes : R. Giraud, C. Monnier.

La teneur en thorium des monazites varie très certainement autant à l'intérieur d'un même cristal qu'en moyenne d'un cristal à l'autre, comme le montrent les dosages effectués à la microsonde électronique. Sauf pour le cristal de la lame BS 4 67, dont la teneur est supérieure à 10 %, les autres mesures indiquent que la teneur moyenne en thorium des monazites est voisine de 8 % (tabl. 4). Récemment, au Centre de Recherches Radiogéologiques de Nancy, par spectrométrie γ , Le Van Tiêt a déterminé la teneur moyenne en thorium d'un lot de monazites soigneusement triées provenant du granite de Sainte-Anne-d'Auray, en Bretagne. Cette teneur est égale à 9 % (Le Van Tiêt, 1968, Communication orale). Ce chiffre est donc voisin de ceux que nous avons obtenus à la microsonde et il est également très significatif, car obtenu à partir d'un matériau très pur. Ces valeurs correspondent aux teneurs maximales en thorium trouvées aussi bien par P. M. Hurley et W. H. Fairbairn (1958) que par W. C. Overstreet (1967) pour des apatites granitiques de provenances diverses.

La teneur en uranium est beaucoup plus variable d'un cristal à l'autre. Egale à 0,33 % dans le cristal de la plage BS 4 60, à 1,7 % dans celui de la plage BS 4 69(1), elle n'a pu être déterminée dans le cristal de la plage BS 4 69(2) parce que trop faible. Les comptages qui ont permis d'obtenir ces teneurs étaient d'ailleurs irréguliers et indiquaient une certaine hétérogénéité dans la répartition. Néanmoins, le fait que l'uranium soit disséminé dans tout le cristal avec une teneur faible, et non pas concentré en certains points avec une teneur élevée, semble bien montrer qu'il se substitue diadochiquement aux autres éléments.

La valeur de 1,7 % paraît élevée si on la compare aux teneurs en uranium des monazites granitiques données par P. M. Hurley et H. W. Fairbairn (1957) (0 à 0,3 %) ou par M. S. Filippov et L. V. Komlev (1959) (0,09 à 0,67 %), mais il ne faut pas

oublier qu'il s'agit probablement d'une teneur maximum ne correspondant qu'à un certain pourcentage des cristaux.

5 — URANIUM DIFFUS

Dans les roches à uraninite, au-dessous de la zone d'oxydation, la biotite a subi assez souvent une chloritisation partielle. A cette altération, qui peut être due à une action météorique profonde ou à des circulations d'origine hydrothermale, il semble que soient liés certains autres phénomènes : la formation de fluorine dans la biotite, celle aussi d'agréats de rutile. Ces derniers sont presque toujours radioactifs, alors que la biotite elle-même ne l'est pas. Il est vraisemblable que cette altération a donné naissance à un gel de titane qui a fixé de l'uranium par adsorption. Un processus semblable a été décrit par J. Goni (1967) pour des gels de titane ayant pris naissance à partir de sphènes contenus dans une granodiorite et ayant adsorbé de l'uranium et d'autres métaux. R. Coppens et J. Bolfa (1963) ont observé un phénomène sensiblement inverse dans le granite de Ploumanac'h (Côtes-du-Nord), où ils ont décrit des sphènes ayant perdu une partie de leur radioactivité à la suite d'un début d'altération en produits amorphes opaques. Dans le granite de Saint-Sylvestre, il est logique de penser que l'uranium piégé par les oxydes de titane était au préalable disséminé dans la masse même de la biotite avant d'être mis en mouvement par l'altération.

Tous les auteurs s'accordent d'ailleurs à considérer que les minéraux cardinaux et essentiels du granite contiennent de l'uranium à l'état diffus, et les analyses de ces minéraux sont là pour leur donner raison. Dans le cas de la biotite qui renferme en outre de nombreuses inclusions radioactives, il est intéressant de citer les travaux de A. N. Komarov et Yu. A. Shukolyakov (1966). Par l'étude des traces dues à la fission spontanée et à la fission provoquée de l'uranium, ces auteurs ont mis en évidence la présence d'uranium dans les micas sous différentes formes : uranium capturé durant la cristallisation et distribué régulièrement dans le minéral, uranium sous forme de films le long des clivages et enfin uranium d'origine supergène adsorbé sur les plans de clivages. Ces techniques qui permettent l'observation directe, donnent évidemment des résultats plus probants que les analyses globales de fractions minérales.

Dans le granite de Saint-Sylvestre, l'uranium disséminé dans la biotite est certainement lié par des énergies très faibles au support comme le sont en général les éléments en traces situés hors du réseau et localisés dans les discontinuités physiques des minéraux (Goni, 1966). Il est donc vraisemblable qu'il constitue au moins une partie de l'uranium entraîné par l'acide chlorhydrique dilué. Déjà, M. Roubault et R. Coppens (1959) ont montré que dans les roches granitiques saines la proportion d'uranium entraîné par l'acide chlorhydrique déci-normal correspondait sensiblement à la proportion d'uranium contenu dans les minéraux essentiels. Ces expériences ont été effectuées sur le granite de Mortagne, en Vendée, du même type que celui de Saint-Sylvestre, et la proportion d'uranium enlevé par l'acide, égale à 27 %, est assez voisine de celle qui est observée dans le granite de Saint-Sylvestre. Pour celui-ci cependant, nous n'avons aucune preuve directe de l'existence d'uranium diffus à l'intérieur des autres minéraux ou même dans les joints, sur les interfaces cristallines.

Il faut remarquer enfin que les cristaux d'uraninite sont sans doute très partiellement attaqués par l'acide chlorhydrique déci-normal. En effet, par suite de la

désintégration de l'uranium en plomb, une certaine quantité d'oxygène est libérée et doit normalement se combiner à UO_2 pour former UO_3 . Compte tenu de la quantité de plomb radiogénique (3-4 %), il peut se former au maximum par ce processus 5,5 % d' UO_3 dans les cristaux. Les phénomènes d'altération qui affectent l'uraninite au-dessous même de la zone d'altération superficielle sont d'ailleurs assez marqués pour ne pas être dus uniquement à cette oxydation.

II - LA GÉOCHIMIE DE L'URANIUM DANS LE GRANITE A GRAIN FIN A DEUX MICAS (GRANITE DE CHATEAUPONSAC)

Le granite de Chateauponsac a été exploré en profondeur par un sondage de 100 m (CS 1) échantillonné et analysé de façon continue jusqu'à 50 m : au delà, il a été prélevé un échantillon de 50 cm tous les cinq mètres. La disparition de l'uraninite est à peu près complète dans les 37 premiers mètres, soit l'épaisseur de la zone d'altération superficielle.

Le granite de Chateauponsac présente ici son aspect le plus habituel. Le grain est fin, la texture xénomorphe grenue, mais certains cristaux de muscovite sont très grands par rapport au grain de la roche. La biotite est régulièrement chloritisée. Albite et oligoclase acide coexistent.

A — TENEUR EN URANIUM DE LA ROCHE SAINTE PROFONDE

L'analyse d'une trentaine d'échantillons dans la partie saine profonde du sondage fait apparaître des variations bien supérieures à celles qui avaient été observées dans les sondages de Margnac. Le coefficient de variation, égal à 0,26, est en effet nettement supérieur au coefficient de variation correspondant aux erreurs analytiques (tabl. 5). Ceci se traduit par un histogramme fortement étalé (fig. 4), pour lequel une spécification normale peut être valablement retenue ($\chi^2 = 2,11 < \chi^2_s = 9,488$ pour $s = 0,05$). C'est probablement à une répartition plus hétérogène des cristaux d'uraninite dans la roche qu'il faut attribuer ces variations de la teneur en uranium, hypothèse confirmée par l'examen des figures 5 et 6. Les graphiques reportés sur ces figures permettent de comparer la teneur en uranium à l'abondance de l'uraninite dans l'échantillon correspondant, ceci dans les sondages effectués sur les trois granites du massif. Dans l'ensemble, il apparaît d'ailleurs une assez bonne corrélation entre les deux données. Nous reviendrons ultérieurement sur ces problèmes, et en particulier sur les raisons d'ordre géologique qui sont susceptibles d'expliquer le comportement différent de l'uranium suivant le granite considéré.

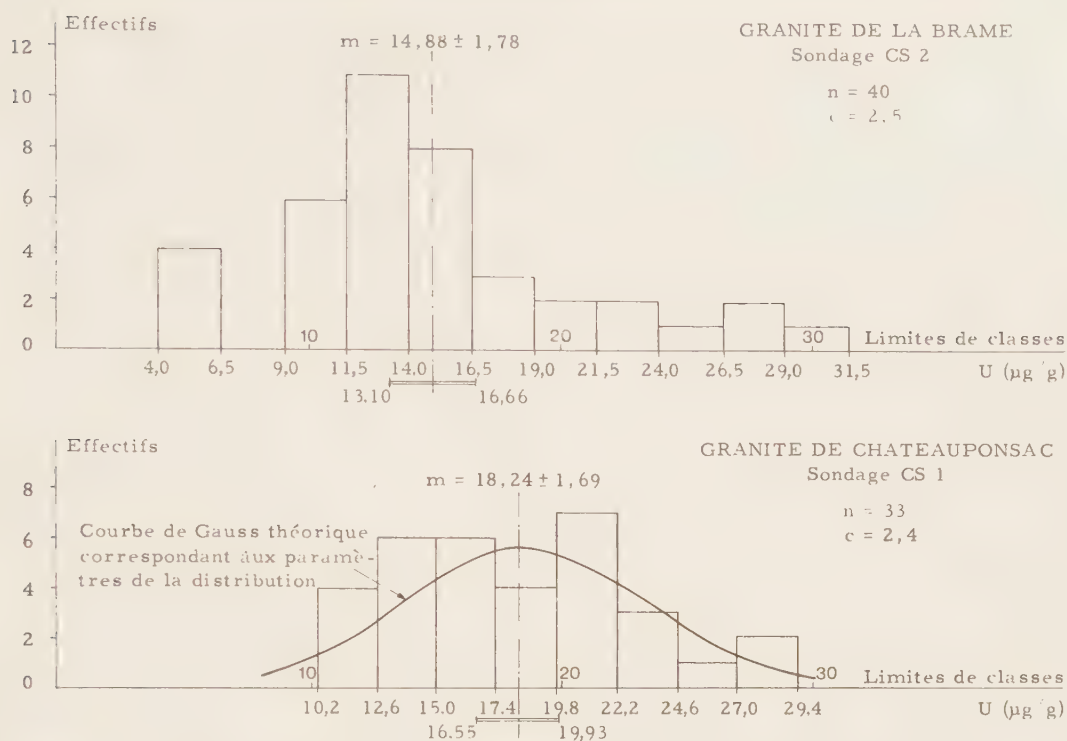


FIG. 4. — Granite de la Brame et granite de Chateauponsac.
Répartition des teneurs en uranium dans la partie saine des sondages.
Les moyennes sont données avec un intervalle de confiance au seuil $s = 95\%$.
n : nombre d'échantillons. — c : intervalle de classe.

	Valeur minimale	Valeur maximale	Moyenne m (en µg/g)	Ecart-type σ	$V = \frac{\sigma}{m}$	Nombre d'échantillons	Test du χ^2 (χ^2_s pour $s = 0,05$)
Granite de Chateauponsac Sondage CS1	11,40	28,50	18,24	4,77	0,26	33	$\chi^2 = 2,11$ ($\chi^2_s = 9,488$)
Granite de la Brame Sondage CS2	5,4	29,60	14,88	5,75	0,40	40	$\chi^2 = 11,26$ ($\chi^2_s = 9,483$)

TABLEAU 5. — Granite de la Brame et granite de Chateauponsac.
Teneurs (en µg/g) en uranium de la roche saine profonde.

La teneur en uranium du granite de Chateauponsac à l'emplacement du sondage CS 1 (18,24 µg/g) ne sort pas de la gamme de teneurs relevées sur le granite à deux micas de Saint-Sylvestre, puisqu'elle est légèrement supérieure à la teneur la plus faible observée dans ce granite, celle de l'échantillonnage des Brugeauds au Nord (17,44 µg/g). La différence observée (0,80 µg/g) n'est évidemment pas significative (tabl. 3). Par contre, vis-à-vis du granite de Saint-Sylvestre dans la région de Margnac, l'appauvrissement en uranium qui apparaît dans le granite de Chateauponsac, s'il reste faible, est néanmoins significatif.

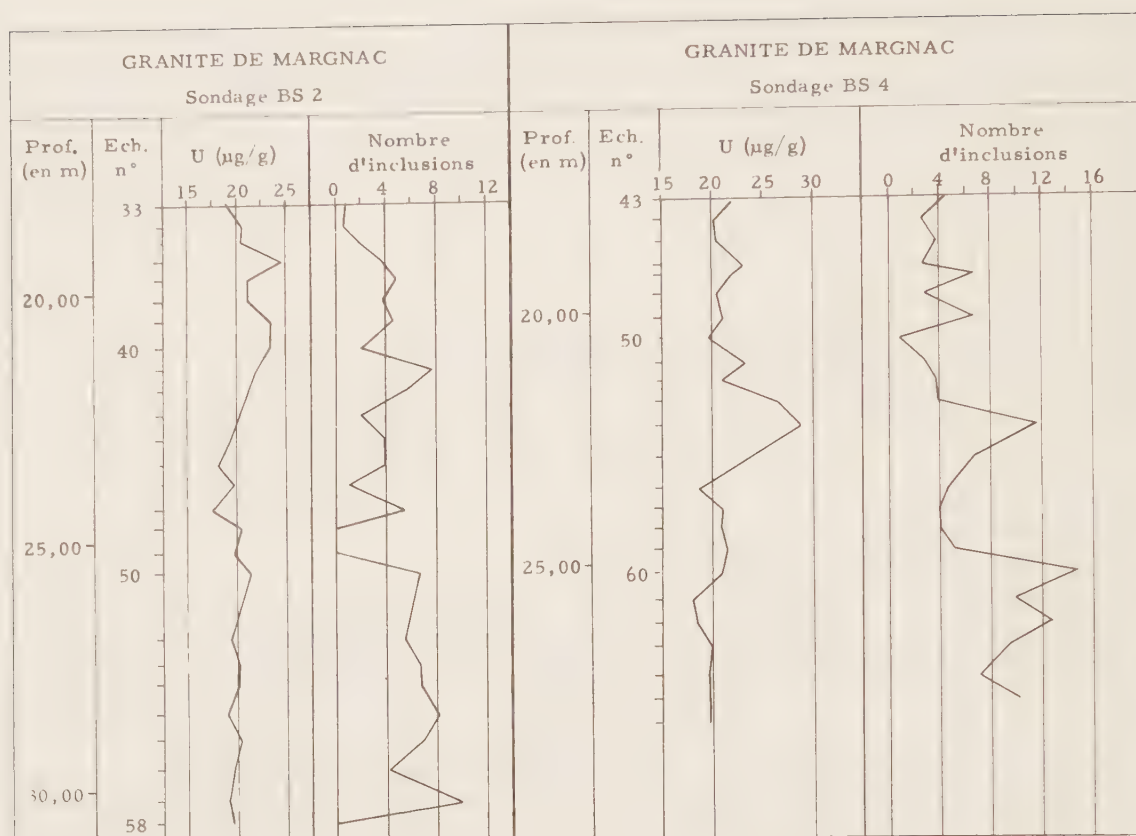


FIG. 5. — Granite à deux micas de Saint-Sylvestre.
Variations comparées des teneurs en uranium et de l'abondance de l'uraninite.

B — LOCALISATION DE L'URANIUM DANS LE GRANITE DE CHATEAUPONSAC

Le mode de localisation de l'uranium dans le granite de Chateauponsac est comparable à celui qui a été décrit pour le granite de Saint-Sylvestre. Il est plus difficile cependant d'évaluer directement les proportions respectives des trois formes principales sous lesquelles apparaît l'uranium. En effet, la partie saine profonde du sondage n'est pas surmontée par un niveau à autunite facilement soluble dans les acides dilués qui permettrait d'évaluer approximativement la proportion de l'uranium contenu dans les cristaux d'uraninite.

La fréquence de l'uraninite est un peu supérieure à celle observée dans le granite à deux micas de Saint-Sylvestre, soit 6,5 cristaux par lame mince contre 4 à 6 cristaux. Mais, dans le granite de Chateauponsac, les dimensions des cristaux sont plus petites (15-20 microns le plus souvent). Ceci est évidemment en accord avec le grain de la roche.

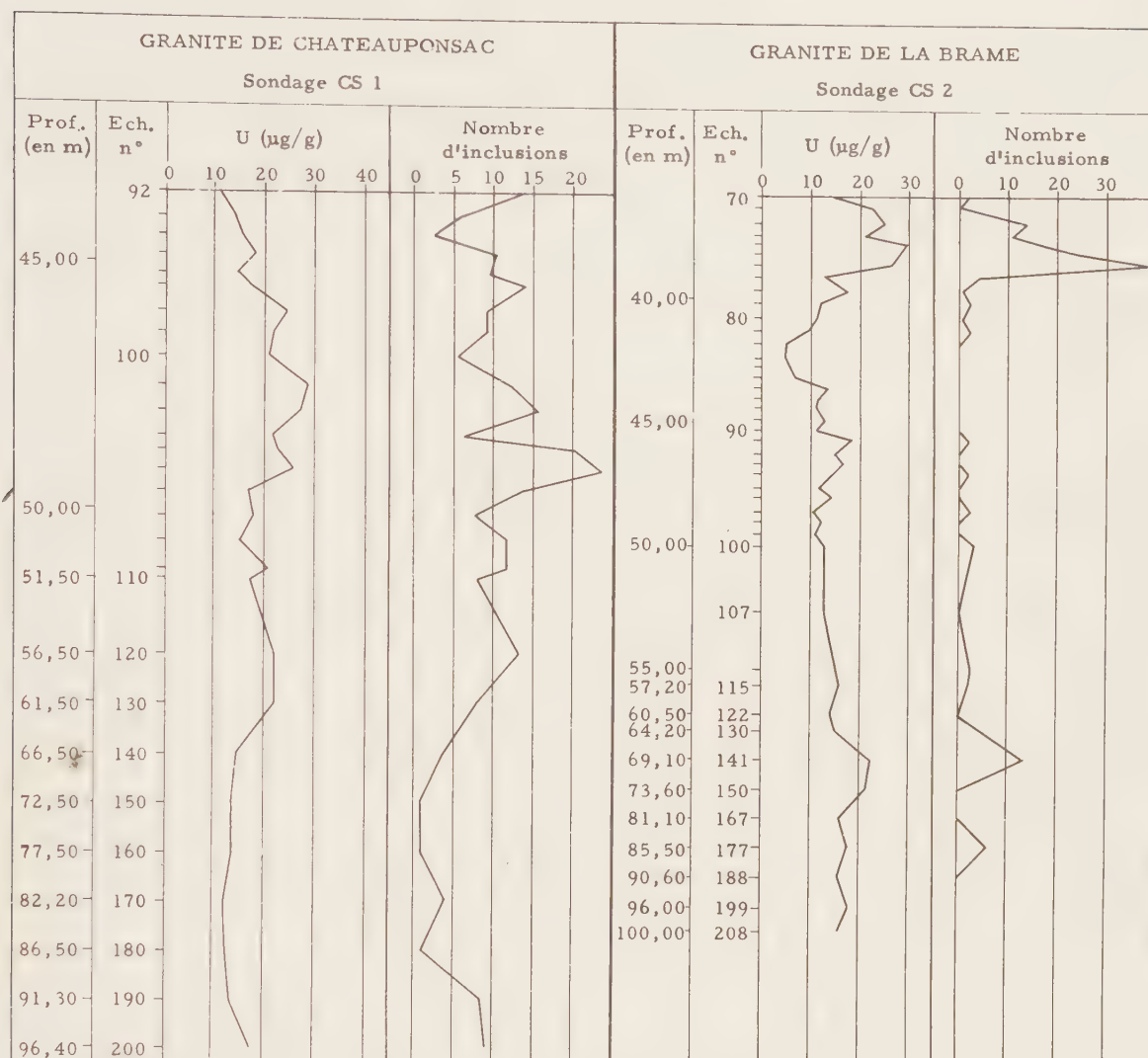


FIG. 6. — Granite de Chateauponsac et granite de la Brame.
Variations comparées des teneurs en uranium et de l'abondance de l'uraninite.

L'uraninite se présente ici également sous forme d'inclusions dans les différents minéraux du granite. Le tableau 6 montre que le quartz et les micas contiennent à eux seuls 70 % de ces inclusions. Par rapport au granite de Saint-Sylvestre, le quartz paraît en contenir un plus grand nombre.

Minéral-hôte	% uraninite contenue dans le minéral		Minéral-hôte
Quartz	35 %	8 %	{ Feldspaths
Muscovite	23 %		{ potassiques
Biotite	14 %	1 %	Apatite
Plagioclases	13 %	6 %	Joints

TABLEAU 6. — Répartition de l'uraninite entre les différents minéraux du granite.

Résultats obtenus pour 428 inclusions réparties dans 66 lames minces.

Dans le granite à deux micas de Chateauponsac, l'environnement auréolaire des cristaux d'uraninite est particulièrement intéressant à étudier. C'est même à partir des premières observations que nous fîmes sur ce granite qu'ont été entreprises des études plus approfondies sur le granite de Saint-Sylvestre. Quel que soit le minéral-hôte, l'uraninite est associée de façon presque systématique à une gangue complexe où habituellement l'observation microscopique ne permet de reconnaître que la pyrite et les oxydes de fer.

Alors que dans le granite de Saint-Sylvestre l'uraninite et la pyrite étaient associées seulement de façon occasionnelle, dans le granite de Chateauponsac on observe presque systématiquement de la pyrite à proximité immédiate de l'uraninite. Il faut noter cependant que l'uraninite n'est jamais incluse dans la pyrite (Pl. VII et VIII).

L'étude à la microsonde électronique révèle l'existence d'un certain nombre d'éléments, ceux-là même qui entraient dans la composition de la gangue de l'uraninite dans le granite de Saint-Sylvestre, avec une disposition en auréoles concentriques particulièrement nette sur la planche VII (fig. 2). Autour de l'uraninite, apparaissent successivement une auréole ferrugineuse, puis une auréole où l'analyse décèle la présence de Zr, P, Ca, Th, et enfin une auréole externe avec une phyllite (Si, Al, K), de la pyrite et des carbonates (C). Cette même auréole phylliteuse se retrouve sur la planche VIII (fig. 1), où l'uraninite est entourée par du fer, du soufre et du calcium, ces deux derniers éléments n'étant pas, semble-t-il, exprimés sous forme de minéraux. Enfin, sur la figure 2 de la planche VIII, il est visible que le phosphore, le zirconium, un peu de calcium, du potassium même sont contenus dans l'uraninite elle-même. Des carbonates, une phyllite et de la pyrite forment l'auréole externe.

C'est une paragenèse identique associée à l'uraninite qui fut retrouvé ensuite dans le granite à deux micas de Saint-Sylvestre. Les phénomènes d'altération deutérique qui accompagnent la formation de l'uraninite sont donc plus marqués dans le granite à grain fin et à deux micas de Chateauponsac. Les gangues pyriteuses et ferrugineuses sont observées de façon presque systématique.

III - LA GÉOCHIMIE DE L'URANIUM DANS LE GRANITE ORIENTÉ A SILLIMANITE (GRANITE DE LA BRAME)

Dans le sondage CS 2, le granite de la Brame présente son faciès type, très orienté : la texture est granolépidoblastique avec des lits importants de sillimanite et de biotite, et souvent de la muscovite parfois disposée en travers de ces lits et paraissant s'être développée secondairement aux dépens de la sillimanite. Il a été montré dans l'étude pétrographique et géochimique du massif que ces phénomènes de muscovitisation s'accroissent au voisinage du granite à deux micas de Saint-Sylvestre (Barbier et Ranchin, 1968 a).

A cette structure d'ensemble et à cette texture hétérogène, correspondent une répartition très irrégulière de l'uraninite, et par voie de conséquence des variations considérables de la teneur en uranium dans un même sondage. La figure 6, sur laquelle sont reportées les variations comparées de la teneur en uranium et de l'abondance de l'uraninite met parfaitement en évidence ce phénomène. Alors que l'uraninite est très rare (1 à 2 cristaux dans une lame mince) ou même absente dans la majorité du sondage, sur une distance d'environ 2 mètres on compte 10 à 40 cristaux par lame mince. Quoique à une échelle plus grande, ceci n'est pas sans rappeler la distribution en « nids » des inclusions radioactives dans le granite de Quintin Magoar en Bretagne telle qu'elle a été décrite par P. Baillet (1963). A ce « nid » d'uraninite correspond évidemment une augmentation très brutale de la teneur, et on compte six échantillons dont la teneur est comprise entre 20 et 30 $\mu\text{g/g}$, alors que la moyenne pour le restant du sondage s'établit autour de 14 $\mu\text{g/g}$. De ce fait, l'histogramme des teneurs en uranium présente une dissymétrie positive très nette, avec un étalement très marqué du côté des valeurs fortes (fig. 4). De ce fait aussi, il est le seul histogramme étudié pour lequel le test du χ^2 donne un résultat négatif et conduit à rejeter la spécification normale (tabl. 6).

Compte tenu de cette hétérogénéité, la teneur moyenne en uranium pour l'ensemble de la partie saine du sondage n'a pas la même représentativité que celles déterminées précédemment dans les autres granites étudiés. Egale à 14,88 $\mu\text{g/g}$ (tabl. 4), elle est cependant nettement inférieure à ces dernières, et surtout aux valeurs obtenues pour le granite de Saint-Sylvestre dans la région de Margnac. De même, la teneur du granite de la Brame est inférieure à celle du granite de Chateauponsac dans le sondage CS 1 (18,24 μg), et la différence est significative (tabl. 3). En fin de compte, seule la différence de teneur avec le granite de Saint-Sylvestre dans l'échantillonnage des Brugeauds ne peut être considérée comme significative.

L'appauvrissement en uranium du granite de la Brame par rapport au granite de Chateauponsac et au granite de Saint-Sylvestre paraît cependant bien réel.

Pour l'ensemble de la partie saine du sondage, on compte en moyenne 3 cristaux d'uraninite par lame mince, ce qui n'a d'ailleurs pas beaucoup de signification car la très grande majorité des cristaux sont concentrés dans une petite fraction du sondage. Cette fréquence est toutefois inférieure à celle qui avait été observée dans le granite de Saint-Sylvestre pour une granulométrie comparable, ce qui peut être corrélé avec la diminution de la teneur moyenne en uranium.

La localisation des cristaux d'uraninite est intéressante à considérer. En effet, une proportion importante d'entre eux, au minimum 30 %, est située dans les joints, entre les différents minéraux, ce qui n'était pas le cas dans les autres granites étudiés. Ceci est particulièrement net dans la fraction du sondage où l'uraninite est concentrée.

Une autre particularité intéressant l'uraninite est l'absence assez générale de gangue, et la pyrite n'a été que rarement observée. Les cristaux d'uraninite sont isolés dans les joints ou dans les minéraux-hôtes : quartz, feldspaths, micas, apatite et sillimanite.

Le mode de localisation général de l'uranium dans le granite de la Brame est analogue quant aux différentes formes présentes à ce qui avait été observé dans les granites précédents. Les proportions respectives de l'uranium attachées aux trois principales formes, uraninite, minéraux accessoires transparents, métal à l'état diffus, sont difficiles à évaluer par suite de la concentration de l'uraninite en « nids ». Dans la roche saine profonde, l'acide chlorhydrique dilué (1 N) entraîne 27 % de l'uranium,

chiffre correspondant à la moyenne de 12 essais sur des échantillons différents. La proportion d'uranium « fixé » serait donc de 73 %, chiffre assez proche de celui obtenu avec le granite de Saint-Sylvestre. D'après les résultats des essais de lixiviation effectués dans la zone d'altération commençante où de l'autunite s'est formée à la suite de la destruction de l'uraninite, il semblerait que celle-ci représente au maximum la moitié de cet uranium fixé, soit environ 36 % de l'uranium total de la roche. Les minéraux accessoires transparents, monazites, zircons, bien développés, ainsi que l'apatite contiendraient le restant de l'uranium, ce qui représente une proportion un peu plus forte que dans le granite à deux micas de Saint-Sylvestre.

IV - AGE DE L'URANINITE DANS LES GRANITES DU MASSIF DE SAINT-SYLVESTRE URANIUM ET DIFFÉRENCIATION GRANITIQUE

L'uranium et le plomb ont été dosés dans deux cristaux d'uraninite contenus respectivement dans un échantillon du granite à deux micas de Chateauponsac et dans un échantillon de granite orienté. Les résultats sont comparables aux valeurs obtenues avec l'uraninite du granite de Saint-Sylvestre (tabl. 7).

Provenance	Minéral-hôte	Uranium	Thorium	Plomb	Age chimique
<u>Granite à deux micas de Saint-Sylvestre</u>					
Les Brugeauds AF 9	Pyrite	82,2 %	—	4,2 %	386 M.A.
Les Brugeauds AF 3	Muscovite	82 %	—	4 %	368 M.A.
Les Brugeauds AF 3-2	Quartz	80 %	—	3,2 %	302 M.A.
Les Brugeauds AF 12-1	Muscovite	*83 % **80,8 %	—	non dosé —	
Les Brugeauds AF 12-12	Chlorite	75,5 %	2 %	3 %	297 M.A.
<u>Granite à deux micas de Chateauponsac</u>					
Sondage CS1, n° 105-2	Muscovite	83,4 %	—	3,2 %	290 M.A.
<u>Granite orienté de la Brame</u>					
Sondage CS2, n° 97	Biotite	83 %	—	4 %	364 M.A.

* Périphérie du cristal. ** Centre du cristal. Analystes : R. Giraud et F. Obrecht.

TABLEAU 7. — Teneurs en éléments radioactifs et en plomb radiogénique des cristaux d'uraninite dans les granites du Massif de Saint-Sylvestre.

Age chimique des cristaux.
(Dosages à la microsonde électronique).

Dans l'ensemble du massif, la gamme des valeurs s'échelonne entre 3,2 et 4,2 % pour le plomb, entre 80 et 83 % pour l'uranium, ceci suivant les cristaux et lorsque

le thorium n'a pas été décelé. A notre avis, les écarts observés entre les différentes mesures doivent être mis sur le compte des erreurs analytiques ou de l'état d'altération des cristaux.

En supposant que tout le plomb contenu est d'origine radiogénique, hypothèse tout à fait plausible, il est possible de calculer l'âge chimique des cristaux par la formule :

$$t = \frac{\text{Pb}}{\text{U} + (0,36 \text{ Th})} \times 7550 \text{ M.A.}$$

établie en prenant comme valeurs des périodes de désintégration celles données par le National Bureau of Standards ($4,5 \cdot 10^9$ ans pour ^{238}U , $1,17 \cdot 10^8$ ans pour ^{235}U et $1,39 \cdot 10^{10}$ ans pour ^{235}Th). Les résultats ainsi obtenus s'échelonnent entre 290 et 390 M.A., et c'est probablement entre ces deux valeurs que doit se trouver l'âge réel de l'uraninite, ce qui correspond à l'époque de l'orogénèse hercynienne. Ces données de base et le calcul lui-même ne peuvent conduire qu'à des résultats approximatifs. Ils sont cependant intéressants à considérer, étant donné que l'analyse des cristaux révèle des quantités d'uranium et de plomb tout à fait comparables pour les trois granites qui forment le massif de Saint-Sylvestre. Par conséquent, les cristaux auraient le même âge quel que soit le granite qui les contient à l'intérieur du massif.

Il n'a pas été fait de mesures géochronologiques récentes sur les granites du Massif de Saint-Sylvestre par la méthode Rb/Sr. Par comparaison avec le massif de Mortagne en Vendée, dont J. Sonet (1967) a montré l'appartenance à l'orogénèse hercynienne, le granite à deux micas de Saint-Sylvestre, qui à tous points de vue doit être rapproché du granite de Mortagne, est certainement hercynien. Il est admis généralement que le granite de la Brame est plus ancien. Selon Ph. Marquaire et M. Moreau (1968), le granito-gneiss de la Brame forme une voûte anticlinale aplatie, de direction sub-méridienne, qui représente un bloc de substratum antéhercynien largement épargné par les phénomènes métasomatiques responsables de la formation du granite à deux micas de Saint-Sylvestre. A l'intérieur même du granite à deux micas de Saint-Sylvestre, il apparaît des passées à sillimanite qui peuvent être considérées comme des résidus de granite gneissique. Inversement, la muscovitisation s'accroît à l'intérieur du granite de la Brame près du contact avec le granite de Saint-Sylvestre. Enfin, une comparaison peut être faite avec le Massif de Millevaches où les feldspaths des granites orientés ont donné des âges plus anciens (550 M.A.) que ceux des leucogranites associés (300 M.A.) : les biotites des granites orientés ont été rajeunies et elles indiquent un âge de 300 M.A. (Lameyre, 1966). Aucun de ces faits ne constitue d'ailleurs une preuve véritable, et cette hypothèse ne pourra être vérifiée que par des mesures radiométriques.

Nous avons vu que la cristallisation de l'uraninite prenait place parmi les phases tardives deutériques de la formation des granites à deux micas à laquelle l'uraninite est manifestement liée. Au moins à l'Ouest, le granite à deux micas de Saint-Sylvestre s'est formé aux dépens du granite orienté, et la remobilisation a été telle qu'elle a pratiquement effacé les structures primitives et a conduit à un état d'homogénéisation très prononcé. Dans le secteur qui est celui du granite orienté et des granites à grain fin à deux micas associés, il semble qu'il faille concevoir une remobilisation partielle qui a conduit à ces granites à grain fin (granite de Chateauponsac), et à des phénomènes très atténués dans les septa de granite orienté ayant subsisté (granite de la Brame) : muscovitisation, rajeunissement probable des biotites.

Au nombre de ces phénomènes, il faut compter sans doute un apport secondaire

en uranium seul qui a donné lieu à la cristallisation d'uraninite dont on a vu que, dans le granite de la Brame, elle était généralement isolée, sans éléments accompagnateurs, et souvent localisée dans les fissures. De façon plus générale, il faut admettre que les granites à deux micas ont été enrichis en uranium lors des remobilisations qui les ont formés. Il y a donc eu apport, ou mieux concentration de l'uranium au niveau des granites à deux micas, car ces phénomènes de différenciation doivent être conçus à une très grande échelle et l'uranium peut avoir été emprunté à des terrains plus profonds ou éloignés par rapport à l'encaissant visible en surface. De là viendrait la richesse en uranium géochimique des granites observés, et, par voie de conséquence, l'abondance tout-à-fait exceptionnelle de l'uraninite dans ces mêmes granites.

CONCLUSIONS

1 — VARIATIONS DE LA TENEUR EN URANIUM A L'INTÉRIEUR D'UN MÊME FACIÈS GRANITIQUE

Les variations de la teneur en uranium sont peu accentuées dans un faciès granitique homogène lorsque les roches analysées sont prélevées en profondeur et n'ont pas subi l'influence de l'altération superficielle. Comme exemple de granite homogène, c'est la partie occidentale du granite à deux micas de Saint-Sylvestre qui a été considérée. Dans la partie saine des sondages, les variations de la teneur ne sont pas supérieures aux écarts analytiques. Sur une distance voisine de un kilomètre, dans une zone particulièrement homogène, la teneur reste pratiquement constante (entre 20 et 22 $\mu\text{g/g}$). Enfin, pour l'ensemble du faciès étudié, la gamme des teneurs obtenues s'échelonne entre 17,40 et 22 $\mu\text{g/g}$, soit des résultats d'ensemble assez homogènes.

Au contraire, dans un granite hétérogène, comme le granite gneissique de la Brame, dans la partie saine d'un sondage, des variations importantes peuvent être observées qui dépassent les écarts analytiques. Dans le cas considéré, ces variations sont dues à une répartition irrégulière des cristaux d'uraninite dans la roche, avec des accumulations en « nids ».

2 — TENEURS EN URANIUM DES DIFFÉRENTS GRANITES DU MASSIF

Tous les granites du massif ont une teneur en uranium élevée. Cette caractéristique est liée manifestement à l'abondance exceptionnelle de l'uraninite dans ces roches, et c'est maintenant un fait bien établi que les gisements uranifères intra-granitiques dans l'Ouest du Massif Central se rattachent à ce contexte géochimique particulier.

La teneur du granite à grain fin et à deux micas de Chateauponsac dans le sondage CS 1 (18,24 $\mu\text{g/g}$) ne sort pas de la gamme des valeurs relevées dans le granite de Saint-Sylvestre, tout en étant pratiquement identique à la teneur la moins élevée observée dans celui-ci. Le granite gneissique de la Brame aurait une teneur plus faible : dans le sondage CS 2, situé pourtant à proximité du contact avec le granite de Saint-Sylvestre (à environ 1,300 km), la teneur en uranium est égale à 14,88 $\mu\text{g/g}$. Mais compte tenu de l'hétérogénéité du granite orienté, ce résultat doit être considéré avec prudence.

3 — LOCALISATION DE L'URANIUM

✓ Dans le granite à deux micas de Saint-Sylvestre, l'uranium est réparti entre les différentes formes observées dans les proportions suivantes :

- uraninite : environ 50 %,
- monazite, zircon, apatite : environ 30 %,
- uranium lié par des énergies très faibles au support et facilement lessivable, dont une partie serait disséminée dans la biotite et peut-être aussi dans les autres minéraux cardinaux et essentiels : environ 20 %.

Parmi les minéraux accessoires transparents de petite taille, la monazite est le plus radioactif. L'analyse à la microsonde révèle que la teneur en uranium est très variable suivant les cristaux ; parfois, ce sont des traces non dosables, mais des teneurs de 0,33 % et 1,7 % ont été décelées ; les comptages permettent de supposer néanmoins que l'uranium est en position diadochique dans le réseau.

L'uranium diffus contenu dans les biotites est révélé par les phénomènes d'altération de type profond à caractère hydrothermal. En effet, il a été déplacé lors de la chloritisation des biotites et adsorbé par les agrégats d'oxydes de titane qui se sont formés avec la chlorite. De la fluorine est également substituée à la biotite.

Dans le granite à deux micas de Chateauponsac, la répartition de l'uranium serait sensiblement identique. Dans le granite gneissique de la Brame, les principales formes sous lesquelles apparaît l'uranium sont toujours les mêmes, mais la proportion d'uranium lié aux minéraux accessoires transparents serait plus forte. La quantité en resterait cependant inchangée étant donné que l'uraninite est moins abondante et la teneur en uranium de la roche plus faible.

4 — ENVIRONNEMENT AURÉOLAIRE DES CRISTAUX D'URANINITE PHÉNOMÈNES D'ALTÉRATION DEUTÉRIQUE ET ÉLÉMENTS ASSOCIÉS A L'URANIUM

Dans les granites à deux micas, l'uraninite est rarement isolée et souvent associée à de la pyrite et à une gangue ferrugineuse complexe où les éléments sont disposés en auréoles concentriques autour des cristaux. Le plus souvent il a été observé :

- une auréole externe avec des phyllites et des carbonates,

— une auréole interne entourant l'uraninite, avec du fer, du calcium, du zirconium, du phosphore, du thorium, des terres rares; beaucoup de ces éléments ne paraissent pas exprimés sous formes de minéraux.

A l'uranium est donc associé tout un cortège d'éléments dont beaucoup d'éléments rares caractéristiques des pegmatites. Ces éléments se sont substitués plus ou moins complètement au minéral-hôte, et ils sont responsables de l'altération produite dans l'environnement auréolaire des cristaux d'uraninite. La cristallisation de l'uraninite et la formation de cette gangue apparaissent donc comme des manifestations deutériques qui prennent place parmi les phases tardives de la granitisation.

Cette altération d'origine deutérique se complique de phénomènes liés à la radioactivité α de l'uraninite. C'est ainsi qu'autour des cristaux d'uraninite inclus dans la biotite, le minéral-hôte est transformé en chlorite, cette auréole chloritisée précédant elle-même une auréole brune pléochroïque. L'analyse à la microsonde met en évidence un déplacement du potassium dans ces auréoles qui devient de plus en plus marqué lorsqu'on se rapproche de l'inclusion d'uraninite. La transformation en chlorite est donc probablement due à l'effet du rayonnement α . De même, dans la muscovite, l'uraninite est entourée par une auréole assez discrète où l'analyse à la microsonde met en évidence un départ du potassium.

Alors que, dans les granites à deux micas, l'uraninite est systématiquement en inclusion dans les autres minéraux, dans le granite gneissique de la Brame une proportion importante des cristaux d'uraninite est observée dans les joints. D'autre part, dans ce granite, l'uraninite est le plus souvent isolée et rarement associée à une gangue.

5 — AGE DE L'URANINITE — CONSÉQUENCES GÉOLOGIQUES

Les dosages effectués à la microsonde électronique ne font pas apparaître de différences cohérentes dans les teneurs en uranium et en plomb des cristaux d'uraninite suivant le granite qui les contient. Les variations observées peuvent être attribuées aux erreurs analytiques ou à l'état d'altération des cristaux, mais de toute façon elles ne sont pas en rapport avec leur provenance. La teneur en uranium varie de la sorte entre 80 et 83,4 % et la teneur en plomb entre 3 et 4,2 %. Les âges chimiques correspondant s'échelonnent entre 290 et 390 M.A. Ces chiffres sont très imprécis et correspondent vraisemblablement à une valeur réelle intermédiaire qui serait l'âge commun de la cristallisation de l'uraninite pour l'ensemble des granites du massif.

L'âge radiométrique des granites du massif n'a pas encore été déterminé, mais le granite à deux micas de Saint-Sylvestre est sans doute hercynien, alors que le granite gneissique de la Brame est peut-être plus ancien. L'uraninite est manifestement liée aux manifestations tardives qui ont accompagné la formation des granites à deux micas, de même que les pegmatites et les minéralisations en Sn, W, Au. Dans les secteurs étudiés, il est probable que les granites à deux micas proviennent d'une remobilisation des granites orientés. Dans ce qui est aujourd'hui le domaine propre de ces derniers, c'est-à-dire celui du granite de la Brame, cette mobilisation n'a été que partielle et a donné les îlots de granite à grain fin et à deux micas du type Chateauponsac. Les septa de granite orienté qui les séparent n'en ont pas moins

subi quelques transformations, et, au nombre de celles-ci, il faut compter sans doute la cristallisation de l'uraninite provoquée par une introduction secondaire d'uranium. Dans l'ensemble du massif, c'est d'ailleurs probablement à un apport ou mieux à une concentration de l'uranium au niveau des granites à deux micas qu'il faut rapporter l'abondance exceptionnelle de l'uraninite et la teneur élevée en uranium. Ce phénomène de concentration doit être conçu dans le cadre régional de la différenciation granitique.

Manuscrit remis le 10 mai 1968.

BIBLIOGRAPHIE

- BAILLET P. (1963). — Le massif granitique de Quintin-Magoar (Côtes-du-Nord). Contribution à l'étude pétrographique des granites et à l'étude géochimique des éléments radioactifs. *Thèse 3^e Cycle*, Nancy.
- BARBIER J. et RANCHIN G. (1968a). — Zonalité pétrographique et géochimique dans le massif granitique de Saint-Sylvestre (Limousin — Massif Central français). *Rapport C.R.R.*, inédit, et *Publication en cours (Rapport C.E.A. R 3684)*.
- BARBIER J. et RANCHIN G. (1968b). — Géochimie de l'uranium dans le massif de Saint-Sylvestre (Limousin — Massif Central français) — Occurrences de l'uranium géochimique primaire et processus de remaniements. *Rapport C.R.R.*, inédit, et *Publication en cours (Rapport C.E.A. R 3684)*.
- BERTHOLLET P. (1958). — Méthodes d'analyses utilisées par la Section de Géochimie. *Notes C.E.A.*, n° 250.
- CHENEVOY M. (1958). — Contribution à l'étude des schistes cristallins de la partie Nord-Ouest du Massif Central français. *Mém. Serv. Carte géol. Fr.*, Paris, Imprimerie Nationale, 428 p.
- COPPENS R. (1949). — Etude de la radioactivité de quelques roches par l'émulsion photographique. *Thèse*, Paris.
- COPPENS R. (1957). — L'utilisation de la plaque photographique « nucléaire » pour l'étude de la radioactivité des roches. *Industries Atomiques*, n° 2, pp. 42-45.
- COPPENS R. et BOLFA J. (1963). — Etude de la radioactivité du granite de Ploumanac'h (Côtes-du-Nord). *88^e Congr. Soc. sav.*, Paris, pp. 227-237.
- COPPENS R. et JURAIN G. (1957). — Répartition de la radioactivité dans un granite voisin du gisement uranifère. *Bull. Soc. fr. Min. Crist.*, Paris, t. LXXX, pp. 95-96.
- DAVIDSON C. F. (1951). — Distribution of radioactivity. *Mining Mag.*, London, V. 35, pp. 239-240.
- DEUTSCH S. (1958). — Etude quantitative de halos pléochroïques dans la biotite. Application à l'estimation de l'âge des roches. *Univ. libre Bruxelles, Centre de Phys. nucl.*, Bull. 42.
- FILIPPOV M. S. and KOMLEV L. V. (1959). — Uranium and thorium in the granitoids of the middle Dnepr region. *Geochemistry*, n° 5.
- GARRELS R. M. and CHRIST C. L. (1959). — Behavior of uranium minerals during oxidation. *U.S. Geol. Survey, Prof. Papers*, Washington, n° 320, pp. 81-89.
- GONI J. (1957). — Sur un phénomène d'altération du sphène et les produits qui en résultent. *Bull. Soc. fr. Minér. Crist.*, Paris, t. LXXX, pp. 199-208.
- GONI J. (1966). — Contribution à l'étude de la localisation et de la distribution des éléments en traces dans les minéraux et les roches granitiques. *Mém. B.R.G.M.*, Paris, n° 45.
- HAMILTON E. H. (1958). — Distribution of radioactivity in rocks and minerals and the effect of weathering on determination of uranium. *Nature*, Vol. 181, pp. 697-698.
- HAYASE I. (1957). — The radioactivity of rocks and minerals studied with nuclear emulsion. — V : Radioactive behavior of granites. *Mem. Coll. Sc. University, Kyoto*, Vol. XXIV, N° 2, pp. 121-154.

- HURLEY P. M. and FAIRBAIRN H. W. (1957). — Abundance and distribution of uranium and thorium in zircon, sphene, apatite, epidote and monazite in granitic rocks. *Trans. Am. Geophysical Union*, n° 38, pp. 939-944.
- JURAIN G. (1962). — Contribution à la connaissance géochimique des familles de l'Uranium-Radium et du Thorium dans les Vosges méridionales. Application de certains résultats en prospection des gisements d'uranium. *Sciences de la Terre*, Nancy, Mém. n° 1.
- KLEPPER M. R. et WYANT D. G. (1955). — Les provinces uranifères. *Actes Conf. Utilisation pacifique Energie atomique*, Genève, t. 6, pp. 247-255.
- KOMAROV A. N. et SHUKOLYAKOV Yu. A. (1966). — Forms of uranium occurrence in micas. *Geochemistry*, n° 6, p. 1065.
- KRYLOV A. Ya. et ATRASHENOK L. Ya. (1959). — The mode of occurrence of uranium in granites. *Geochemistry*, n° 3, pp. 307-313.
- LAMEYRE J. (1966). — Leucogranites et muscovitisation dans le Massif Central français. *Ann. Fac. Sci. Clermont-Ferrand*, n° 29.
- LARSEN E. S. Jr., PHAIR G., GOTTFRIED D. et SMITH W. L. (1955). — L'uranium dans la différenciation magmatique. *Actes Conf. Utilisation pacifique Energie atomique*, Genève, t. 6, p. 275-285.
- LEONOVA L. L. and RENNE O. S. (1964). — Distribution of uranium, thorium and potassium in homogeneous granites. *Geochemistry*, n° 4, pp. 775-781.
- LEONOVA L. L. and TAUSON L. V. (1958). — The distribution of uranium in the minerals of Caledonian granitoids of the Susamyr Batholith. *Geochemistry*, n° 7.
- MORICE E. et CHARTIER F. (1954). — Méthode statistique. Imprimerie Nationale, Paris.
- NEUERBURG G. H. (1955). — L'uranium dans les roches ignées des Etats-Unis d'Amérique. *Actes Conf. Utilisation pacifique Energie atomique*, Genève, t. 6, pp. 264-274.
- OVERSTREET W. C. (1967). — The geologic occurrence of monazite. *U.S. Geol. Surv., Prof. Pap.*, Washington, n° 530.
- MARQUAIRE Ch. et MOREAU M. (1968). — Esquisse géologique du Nord Limousin et répartition des minéralisations uranifères. *Rapport*, inédit, et *Publication en cours (Rapport C.E.A. R 3684)*.
- PICCIOTTO E. (1950). — L'étude de la radioactivité des roches par la méthode photographique. *Bull. Soc. belge Géol. Paléont. Hydrol.*, vol. 59, pp. 170-198.
- ROUBAULT M. et COPPENS R. (1957). — Etude de la radioactivité du massif granitique de Carnac (Morbihan). *82^e Congr. Soc. sav.*, Paris, p. 31-43.
- ROUBAULT M. et COPPENS R. (1959). — Influence de l'altération sur la répartition des éléments radioactifs dans les roches. *84^e Congr. Soc. sav.*, pp. 287-295.
- ROUBAULT M. et COPPENS R. (1960). — Etude de la radioactivité des roches encaissantes d'un gisement uranifère. *85^e Congr. Soc. sav.*, p. 233-248.
- SONET J. (1967). — Contribution à l'étude géochronologique du massif de Mortagne (Vendée). *C. R. Acad. Sci.*, Paris, t. 264, pp. 225-228.
- TAUSON L. V. (1956). — Geochemistry of uranium in granitoids of the Chernovinsky Massif (Altai Mountains). *Geochemistry*, n° 3, pp. 236-245.
-

PLANCHES
PHOTOGRAPHIQUES

PLANCHE I

*CRISTAUX D'URANINITE INCLUS DANS LA PYRITE, LA MUSCOVITE
OU LE FELDSPATH POTASSIQUE
(GRANITE A DEUX MICAS DE SAINT-SYLVESTRE)*

FIG. 1. — Cristaux d'uraninite inclus dans la pyrite.

1a. — Microphotographie d'un cristal d'uraninite inclus dans la pyrite à l'intérieur d'une biotite. Margnac, sondage BS 1, lame polie BS 1 27, lumière naturelle transmise ($\times 535$).

1b-c. — Images obtenues par balayage à la microsonde électronique d'un cristal d'uraninite inclus dans une plage de pyrite. Mine des Brugeauds, lame polie AF 9 ($\times 175$). 1b : répartition de l'uranium. 1c : répartition du fer.

FIG. 2. — Cristal d'uraninite inclus dans une muscovite en bordure d'une plage de quartz. Mine des Brugeauds, lame polie AF 3 (plage 1).

2a-b-c. — Images obtenues par balayage à la microsonde électronique ($\times 330$). 2a : répartition de l'uranium. 2b : répartition du plomb. 2c : répartition du silicium.

FIG. 3. — Cristal d'uraninite au contact d'une apatite à l'intérieur d'une muscovite. Mine des Brugeauds, lame polie AF 12.

3a. — Microphotographie en lumière naturelle transmise ($\times 100$).

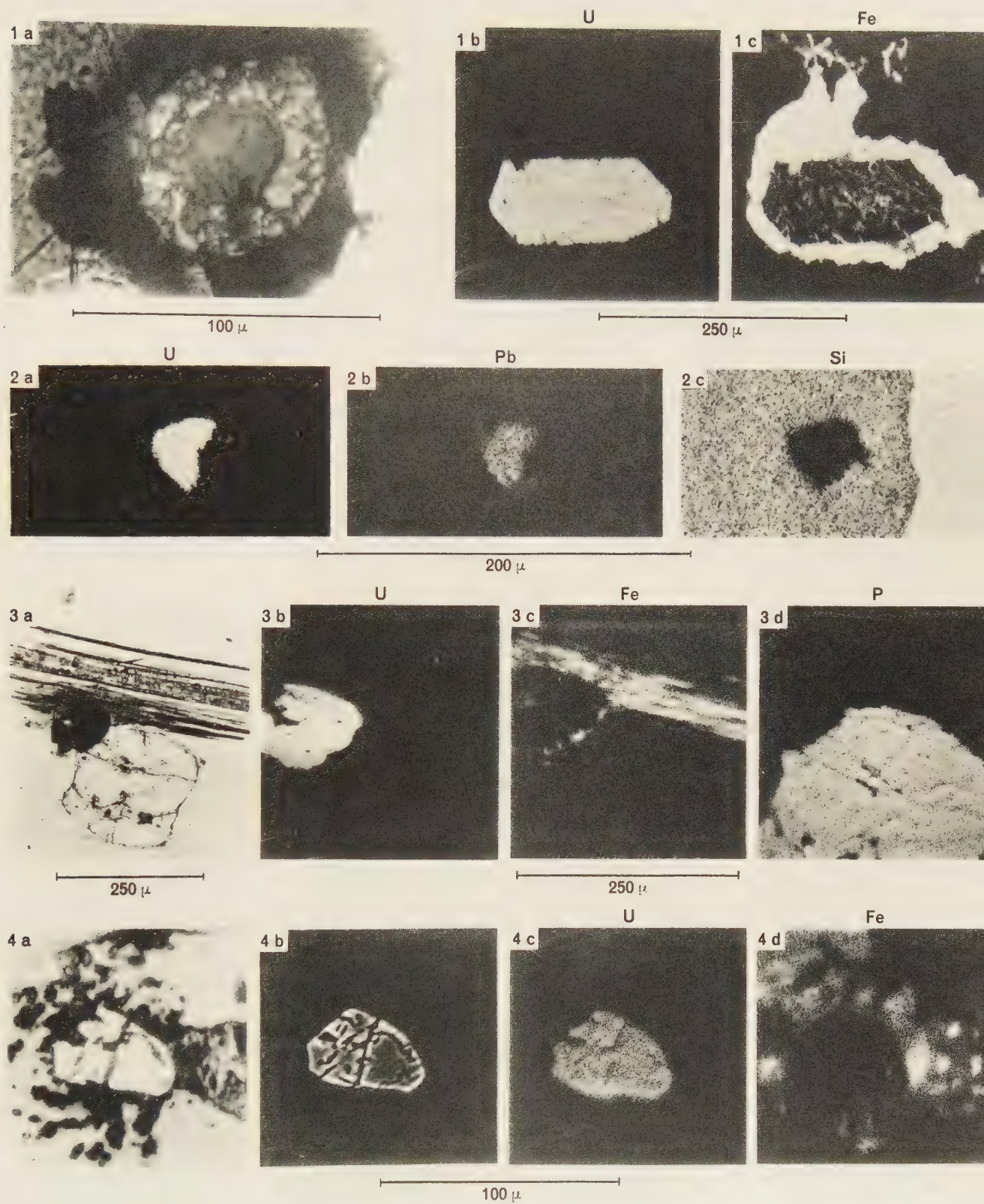
3b-c-d. — Images obtenues par balayage à la microsonde électronique ($\times 155$). 3b : répartition de l'uranium. 3c : répartition du fer. 3d : répartition du phosphore.

FIG. 4. — Cristal d'uraninite inclus dans un feldspath potassique. Mine des Brugeauds, lame polie DF 106 ($\times 420$).

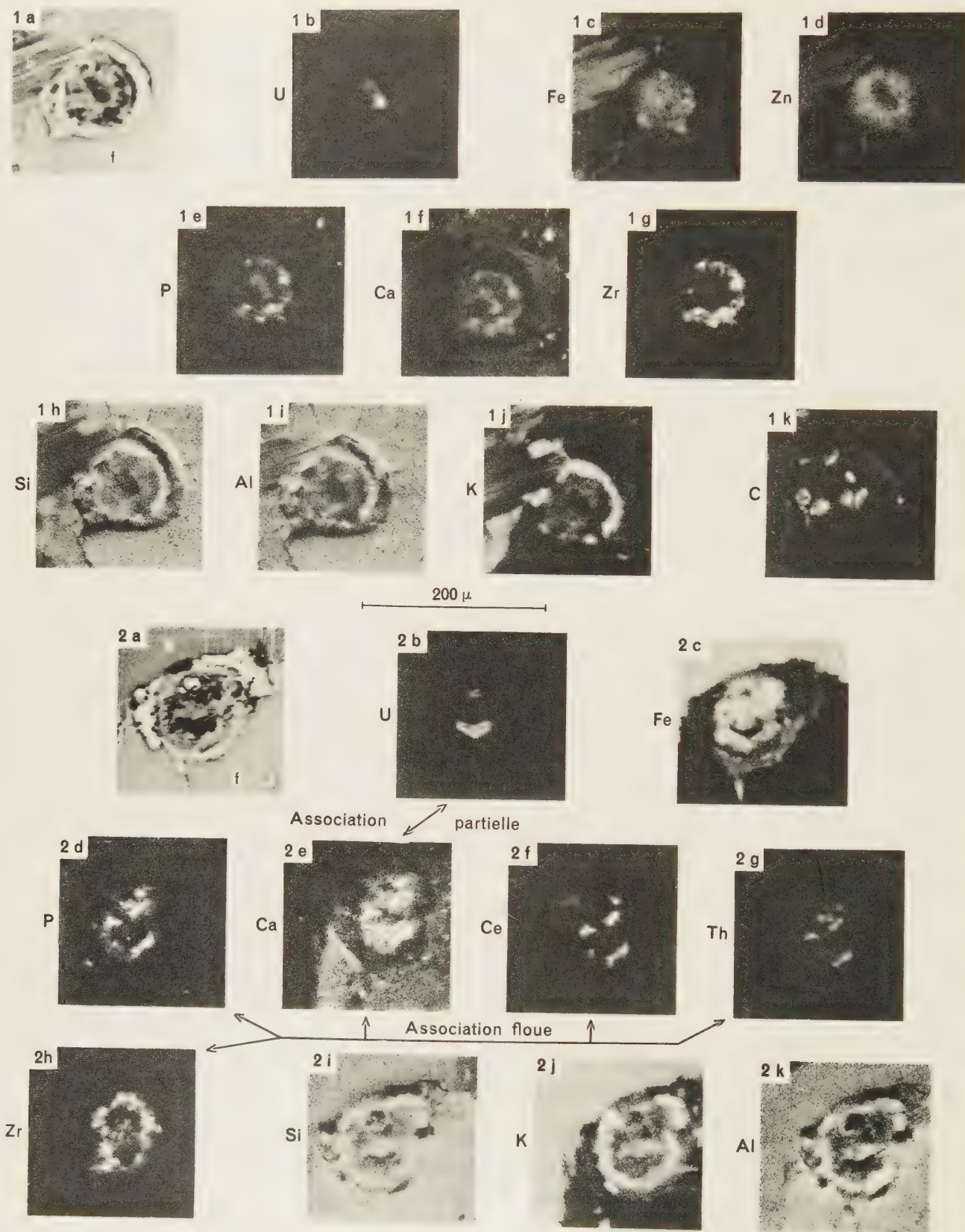
4a. — Microphotographie en lumière réfléchie.

4b. — Image électronique obtenue à la microsonde (signal positif).

4c-d. — Images obtenues par balayage à la microsonde électronique. 4c : répartition de l'uranium. 4d : répartition du fer.



G. RANCHIN. — Contribution à l'étude de la répartition de l'uranium à l'état de traces dans les roches granitiques saines.
Les granites à teneur élevée du Massif de Saint-Sylvestre (Limousin - Massif Central français)



G. RANCHIN. — Contribution à l'étude de la répartition de l'uranium à l'état de traces dans les roches granitiques saines.
Les granites à teneur élevée du Massif de Saint-Sylvestre (Limousin - Massif Central français)

PLANCHE II

*RÉSIDUS D'URANINITE INCLUS DANS UN OXYDE DE FER ROUGEÂTRE ET ÉLÉMENTS ASSOCIÉS**(ZONE D'ALTÉRATION COMMENÇANTE)**(GRANITE A DEUX MICAS DE SAINT-SYLVESTRE)*

FIG. 1 et 2. — Margnac, sondage BS 1, lame polie BS 1 24 (page 2) ($\times 160$).

1a et 2a. — Images électroniques obtenues à la microsonde (signal négatif). *b* : biotite; *f* : plagioclase.

1b à 1k. — Images obtenues par balayage à la microsonde électronique. 1b : répartition de l'uranium. 1c-d : répartition du fer et du zinc. 1e-f-g : répartition du phosphore, du calcium et du zirconium. 1h-i-j : répartition du silicium, de l'aluminium et du potassium. 1k : répartition du carbone.

2b à 2k. — Images obtenues par balayage à la microsonde électronique. 2b : répartition de l'uranium. 2c : répartition du fer. 2d-e-f-g : répartition du phosphore, du calcium, du cérium et du thorium. 2h : répartition du zirconium. 2i-j-k : répartition du silicium, du potassium et de l'aluminium.

PLANCHE III

CRISTAUX D'URANINITE INCLUS DANS LE PLAGIOCLASE, LA BIOTITE OU LA MUSCOVITE
(*GRANITE A DEUX MICAS DE SAINT-SYLVESTRE*)

FIG. 1. — Cristaux d'uraninite inclus dans le plagioclase et entourés d'une auréole complexe. Margnac, sondage BS 4.

1a-b. — Microphotographies en lumière naturelle ($\times 800$). 1a : lame polie BS 4 60. 1b : lame polie BS 4 62. (Longueur du bâton : 150 μ au lieu de 50 μ).

1c. — Image électronique obtenue à la microsonde (signal positif) ; lame polie BS 4 33 ($\times 330$).
s : séricite ; u : uraninite.

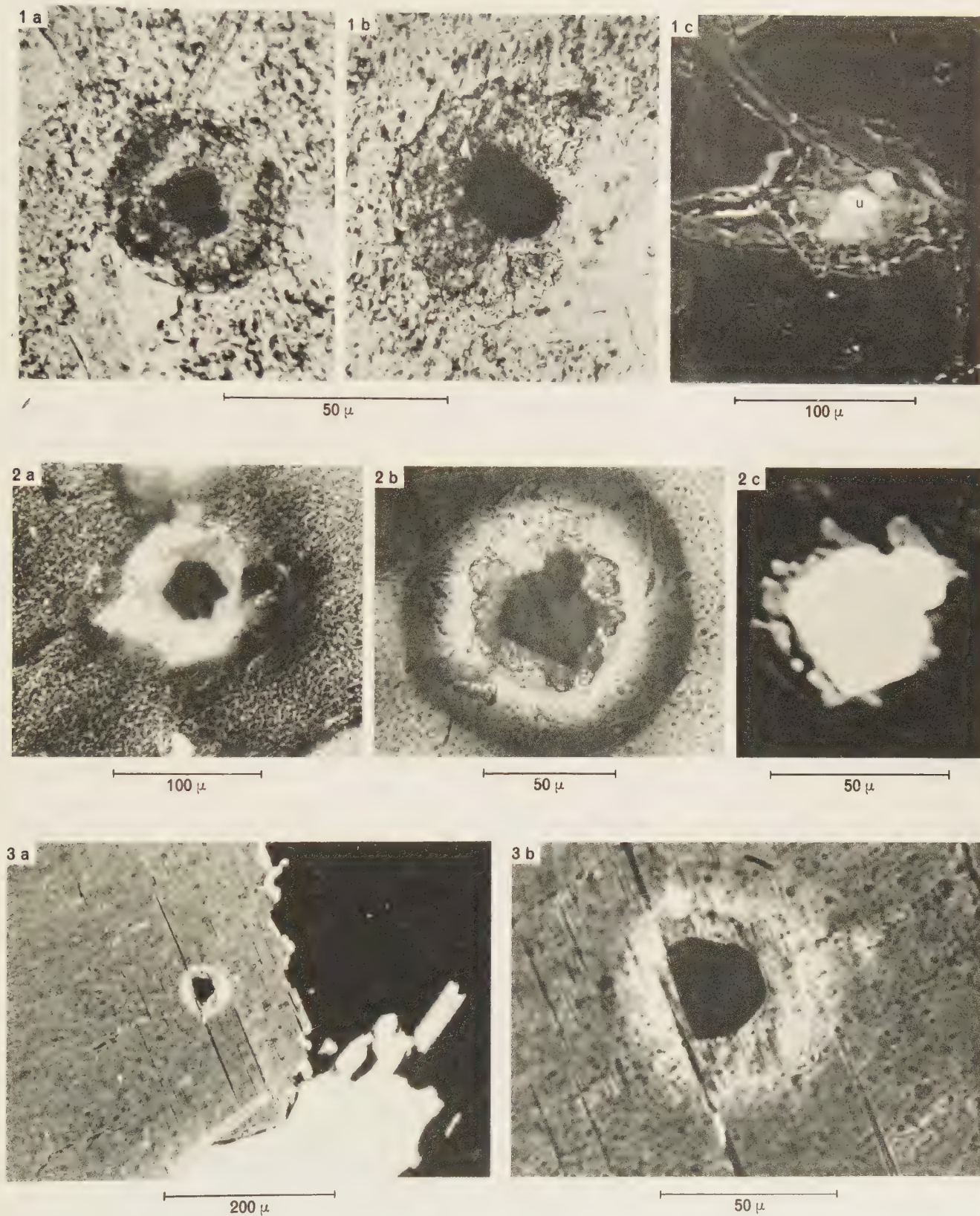
FIG. 2. — Cristaux d'uraninite inclus dans la biotite et entourés d'une auréole complexe. Margnac, sondage BS 4.

2a. — Microphotographie en lumière naturelle, lame mince BS 4 47 ($\times 265$).

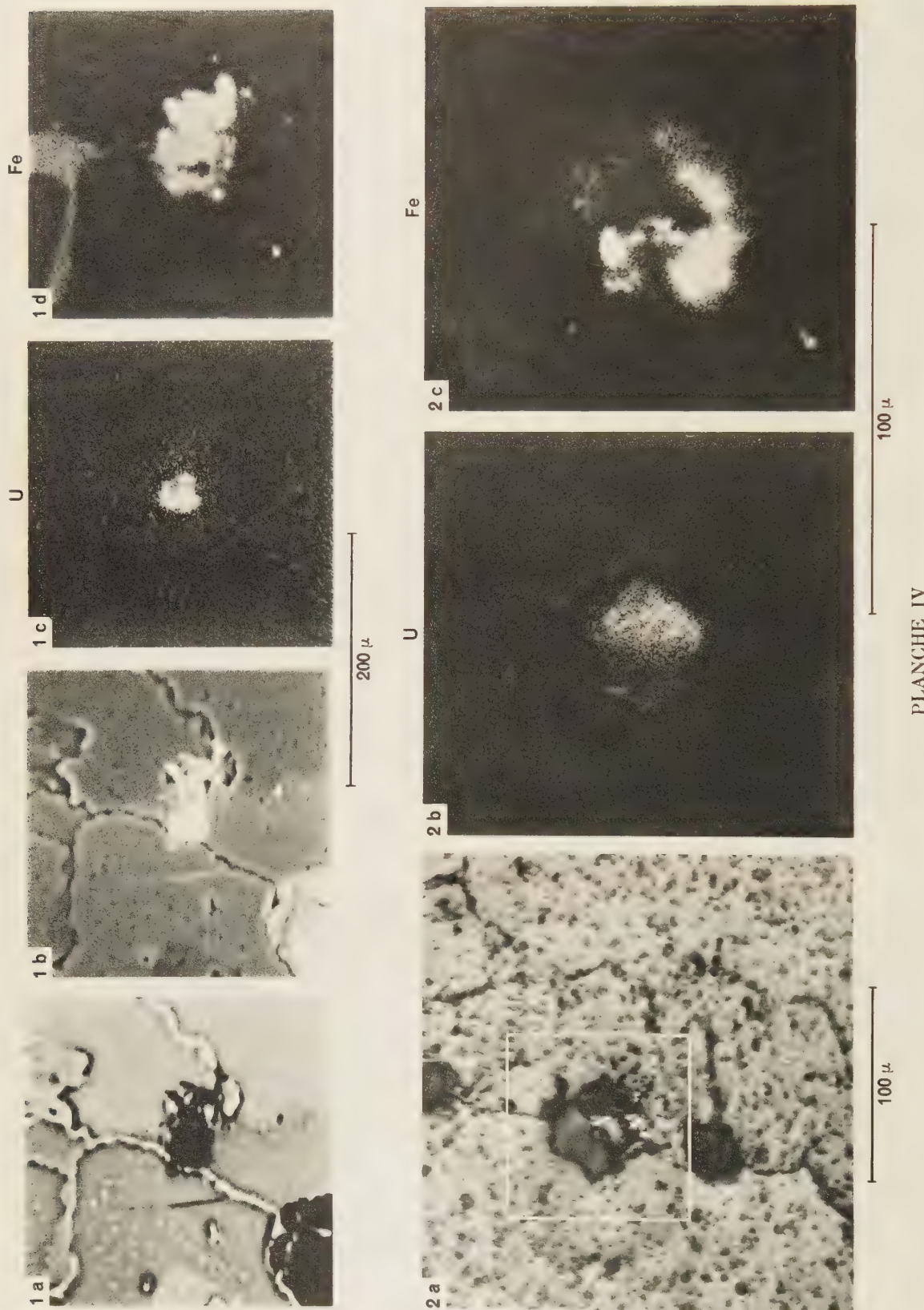
2b-c. — Microphotographie en lumière naturelle ($\times 480$) (2b) et image électronique, signal positif ($\times 650$) (2c) ; lame polie BS 4 69.

FIG. 3. — Cristal d'uraninite inclus dans la muscovite. Margnac, sondage BS 4, lame polie BS 4 69.

3a-b. — Microphotographies en lumière polarisée ($\times 152$ et $\times 640$).



G. RANCHIN. — Contribution à l'étude de la répartition de l'uranium à l'état de traces dans les roches granitiques saines.
Les granites à teneur élevée du Massif de Saint-Sylvestre (Limousin - Massif Central français)



ASSOCIATION D'OXYDE DE FER ET D'OXYDE D'URANIUM CRYSTALLINS DANS LES FISSURES DU QUARTZ
(GRANITE A DEUX MICAS DE SAINT-SYLVESTRE)

FIG. 1. — Margnac, sondage BS 1 27 ($\times 210$).

1a-b. — Images électroniques obtenues à la microsonde, signal négatif (1a) et signal positif (1b).

1c-d. — Images obtenues par balayage à la microsonde électronique. Répartition de l'uranium (1c) et du fer (1d).

FIG. 2. — Mine des Brugauds, lame polie DF 93.

2a. — Microphotographie en lumière réfléchie ($\times 320$).

2b-c. — Images obtenues par balayage à la microsonde électronique ($\times 650$). 2b : répartition de l'uranium. 2c : répartition du fer.

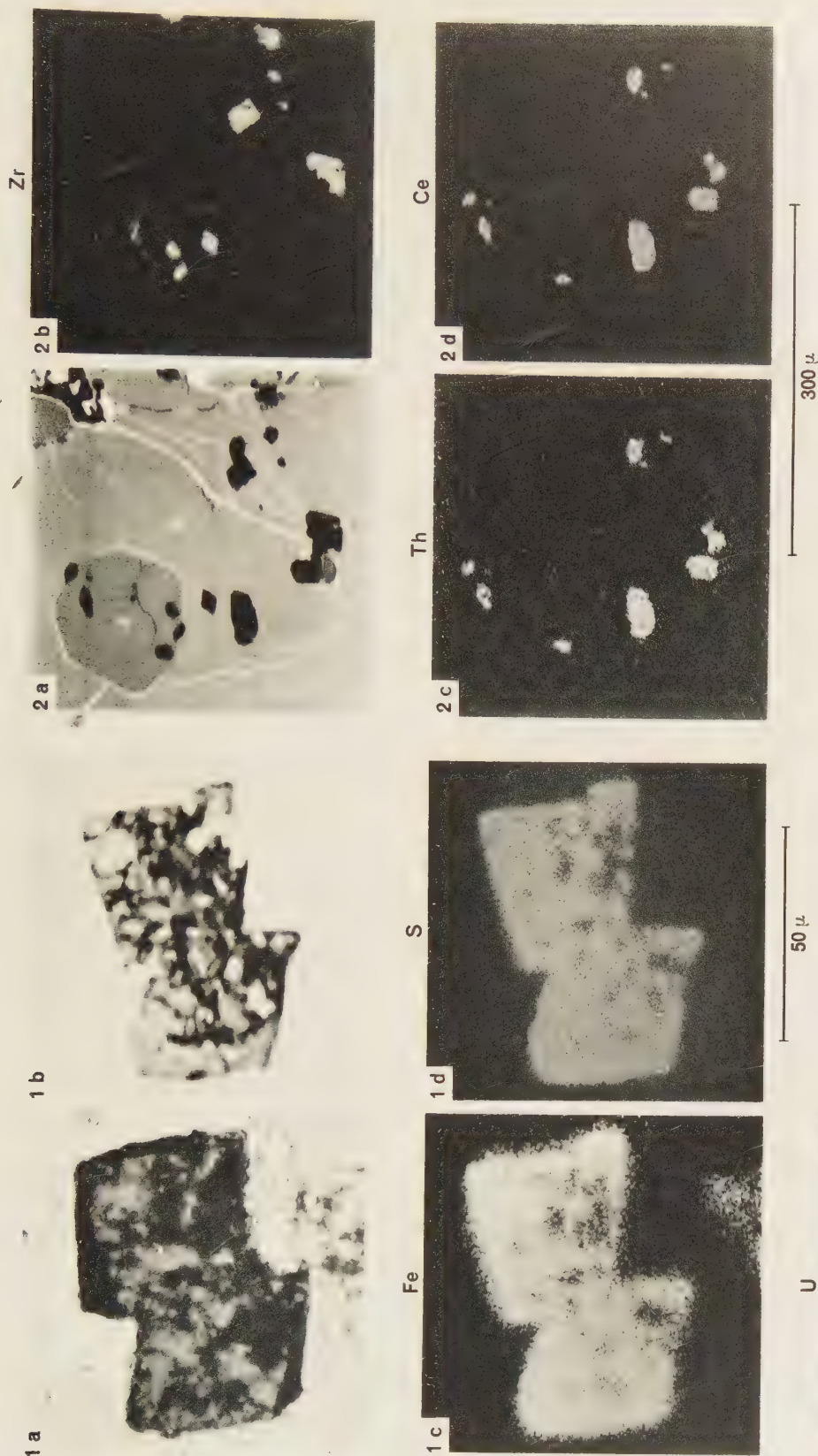


PLANCHE V

PYRITE URANIFÈRE — MONAZITES ET ZIRCONS INCLUS DANS LA BIOTITE
(GRANITE A DEUX MICAS DE SAINT-SYLVESTRE)

Fig. 1. — Pyrite uranifère. Mine des Brugcauds, lame polie DF 148 ($\times 650$).

1a. — Microphotographie en lumière naturelle transmise.

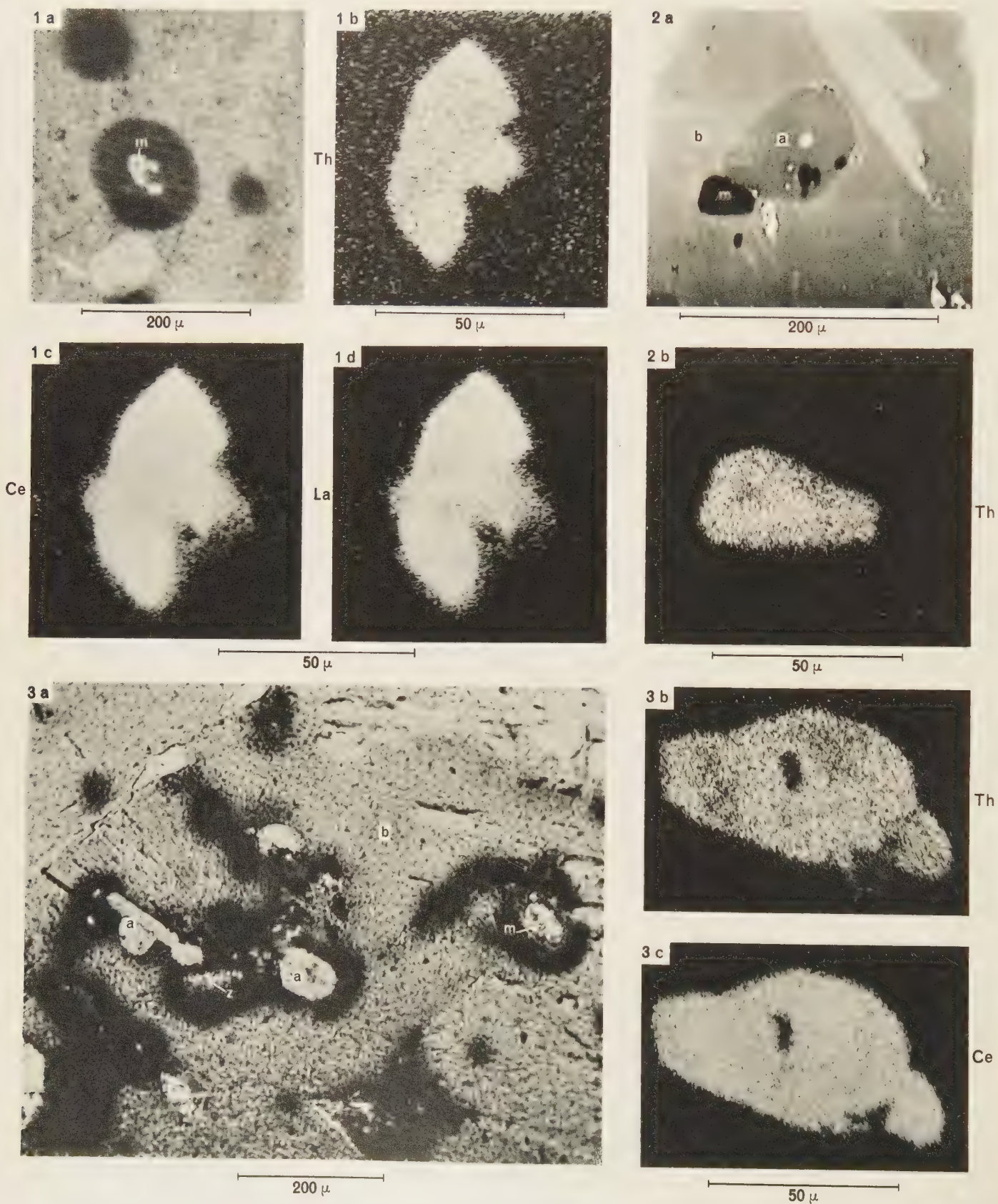
1b. — Image électronique obtenue à la microsonde, signal négatif.

1c-d-e. — Images obtenues par balayage à la microsonde électronique. 1c : répartition du fer. 1d : répartition du soufre. 1e : répartition de l'uranium.

Fig. 2. — Monazites et zircons inclus dans la biotite. Margnac, sondage BS 4, lame polie BS 4 62 ($\times 175$).

2a. — Image électronique, signal négatif.

2b-c-d. — Images obtenues par balayage à la microsonde électronique. Répartition du zirconium (zircons) (2b); répartition du thorium (2c) et du cérium (2d) (monazites).



G. RANCHIN. — Contribution à l'étude de la répartition de l'uranium à l'état de traces dans les roches granitiques saines.
Les granites à teneur élevée du Massif de Saint-Sylvestre (Limousin - Massif Central français)

PLANCHE VI

*RÉPARTITION DU THORIUM, DU CÉRIUM ET DU LANTHANE DANS LA MONAZITE
(GRANITE A DEUX MICAS DE SAINT-SYLVESTRE)*

Fig. 1. — Cristal de monazite inclus dans la biotite. Margnac, sondage BS 4, lame polie BS 4 69 (page 1).

1a. — Microphotographie en lumière naturelle ($\times 160$). *b* : biotite; *m* : monazite.

1b-c-d. — Images obtenues par balayage à la microsonde électronique sur le cristal de monazite de la figure 1a. 1b : répartition du thorium ($\times 700$). 1c-d : répartitions du cérium et du lanthane ($\times 730$).

Fig. 2. — Cristal de monazite inclus dans la biotite. Margnac, sondage BS 4, lame polie BS 4 60.

2a. — Image électronique obtenue à la microsonde (signal négatif) ($\times 240$). *a* : apatite; *b* : biotite; *m* : monazite.

2b. — Images obtenues par balayage à la microsonde électronique ($\times 700$). Répartition du thorium dans le cristal de monazite de la figure 2a.

Fig. 3. — Cristal de monazite inclus dans la biotite. Margnac, sondage BS 4, lame polie BS 4 69 (page 2).

3a. — Microphotographie en lumière naturelle ($\times 135$). *a* : apatite; *b* : biotite; *m* : monazite; *z* : zircon.

3b-c. — Images obtenues par balayage à la microsonde électronique ($\times 700$). 3b-c : répartition du thorium et du lanthane dans la monazite de la figure 3a.

PLANCHE VII

CRISTAL D'URANINITE ASSOCIÉ A LA PYRITE
CRISTAL D'URANINITE INCLUS DANS UN PLAGIOCLASE ET SON ENVIRONNEMENT AURÉOLAIRE
(GRANITE DE CHATEAUPONSAC)

FIG. 1. — Cristal d'uraninite associé à la pyrite. Sondage CS 1, lame polie CS 1 104 ($\times 215$).

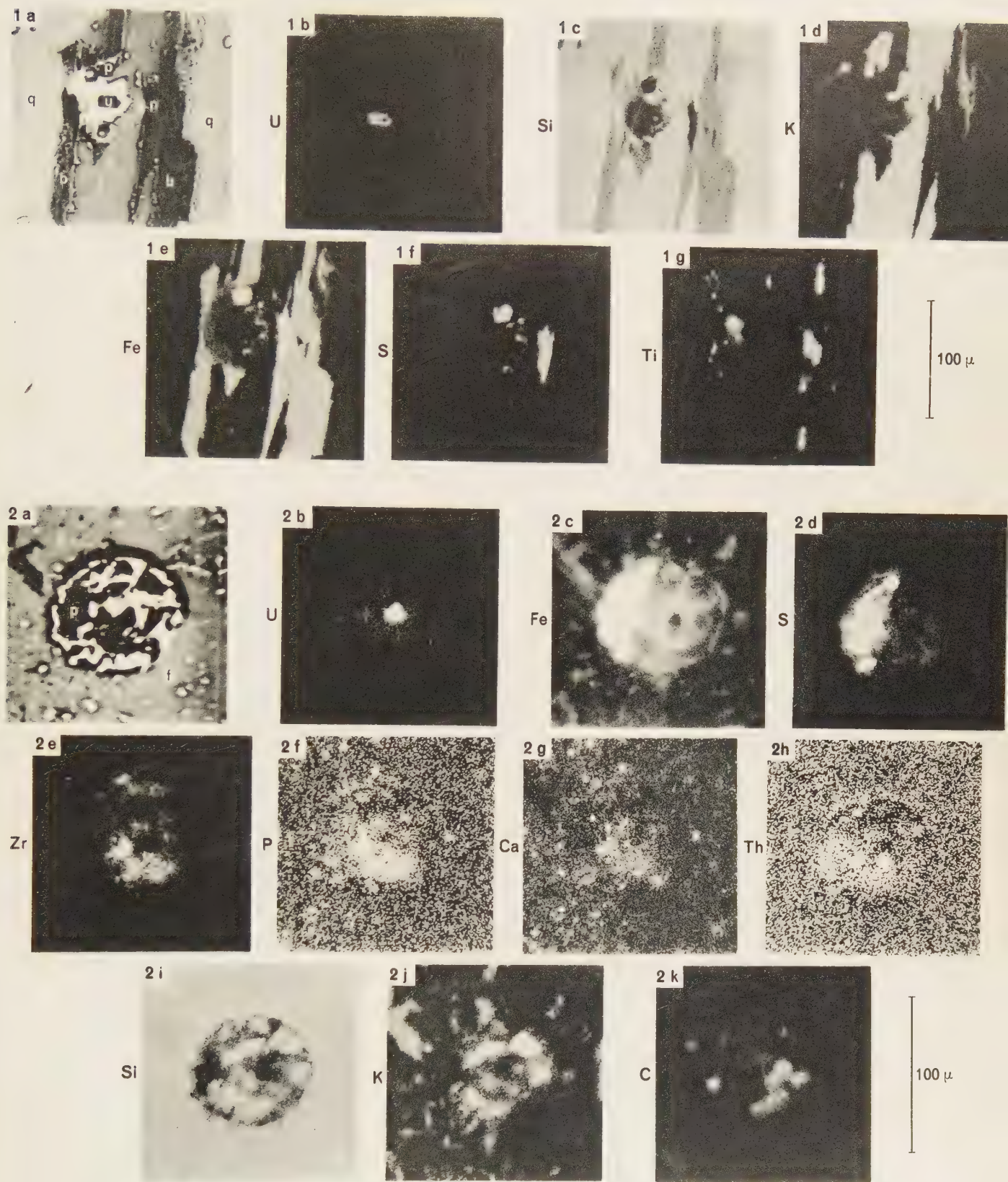
1a. — Image électronique obtenue à la microsonde (signal négatif). *b* : biotite; *f* : feldspath potassique; *p* : pyrite; *q* : quartz.

1b à 1g. — Images obtenues par balayage à la microsonde électronique. 1b : répartition de l'uranium. 1c-d : répartition du silicium et du potassium. 1e-f : répartition du fer et du soufre. 1g : répartition du titane.

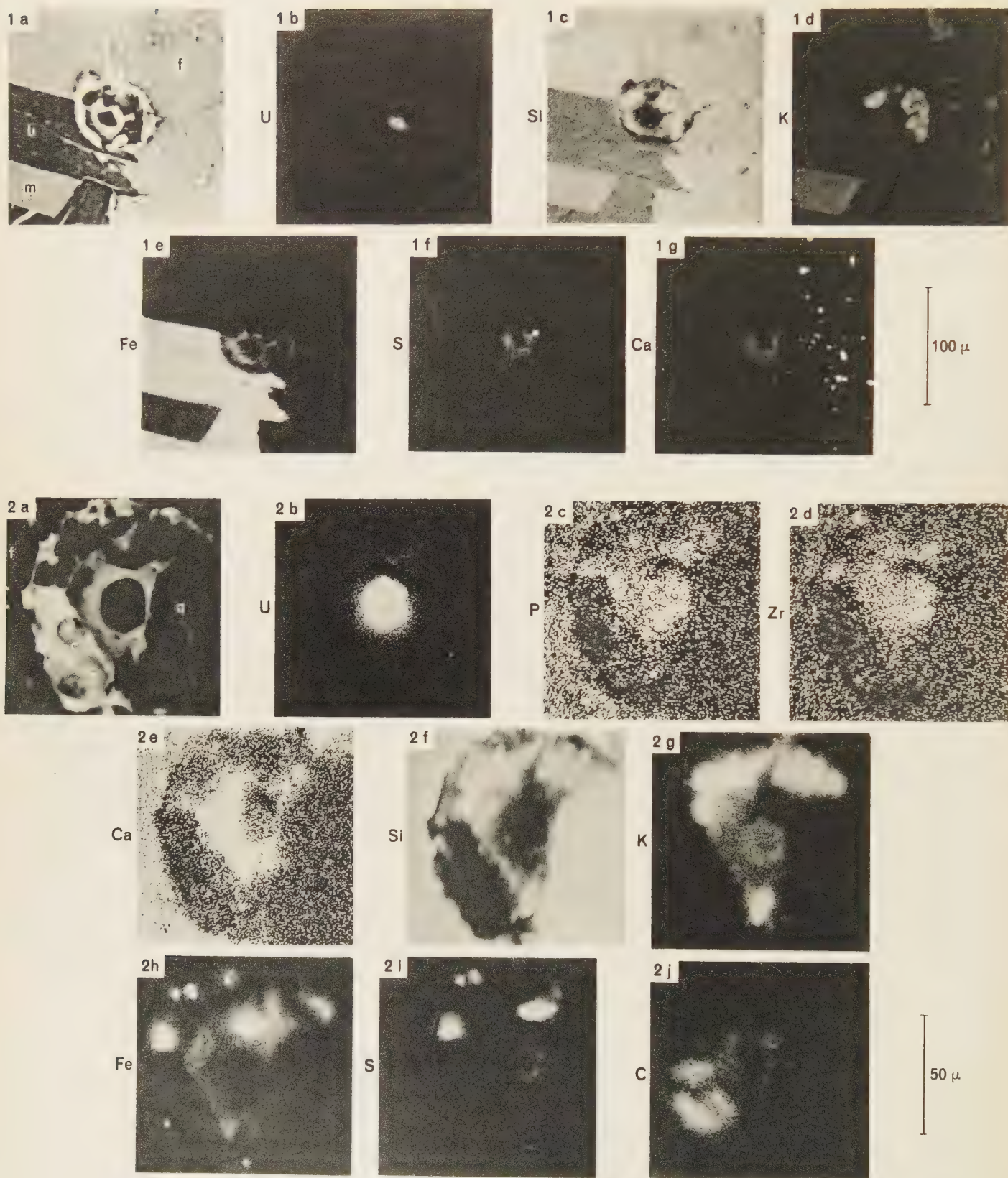
FIG. 2. — Cristal d'uraninite inclus dans un plagioclase et son environnement auréolaire. Sondage CS 1, lame polie CS 1 96 (plage 1) ($\times 290$).

2a. — Image électronique obtenue à la microsonde (signal négatif). *f* : plagioclase; *p* : pyrite.

2b à 2k. — Images obtenues par balayage à la microsonde électronique. 2b : répartition de l'uranium. 2c-d : répartition du fer et du soufre. 2e-f-g-h : répartition du zirconium, du phosphore, du calcium et du thorium. 2i-j : répartition du silicium et du potassium. 2k : répartition du carbone.



G. RANCHIN. — Contribution à l'étude de la répartition de l'uranium à l'état de traces dans les roches granitiques saines.
Les granites à teneur élevée du Massif de Saint-Sylvestre (Limousin - Massif Central français)



G. RANCHIN. — Contribution à l'étude de la répartition de l'uranium à l'état de traces dans les roches granitiques saines.
Les granites à teneur élevée du Massif de Saint-Sylvestre (Limousin - Massif Central français)

PLANCHE VIII

CRISTAUX D'URANINITE ET LEUR ENVIRONNEMENT AURÉOLAIRE (GRANITE DE CHATEAUPONSAC)

FIG. 1. — Sondage CS 1, lame polie CS 1 105 ($\times 215$).

1a. — Image électronique obtenue à la microsonde (signal négatif). *b* : biotite; *f* : plagioclase; *m* : muscovite.

1b à 1g. — Images obtenues par balayage à la microsonde électronique. 1b : répartition de l'uranium. 1c-d : répartition du silicium et du potassium. 1e : répartition du fer. 1f-g : répartition du soufre et du calcium.

FIG. 2. — Sondage CS 1, lame polie CS 1 96 (plage 2) ($\times 430$).

2a. — Image électronique obtenue à la microsonde (signal négatif). *c* : carbonate; *f* : plagioclase; *q* : quartz.

2b à j. — Images obtenues par balayage à la microsonde électronique. 2b : répartition de l'uranium. 2c-d : répartition du phosphore et du zirconium. 2e : répartition du calcium. 2f-g : répartition du silicium et du potassium. 2h-i : répartition du fer et du soufre. 2j : répartition du carbone.

IMPRIMERIE LOUIS-JEAN - 05 - GAP

Publications scientifiques
et littéraires

Dépôt légal n° 463-1969



